

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**TESIS**

**COMPENSACIÓN DEL EFECTO DE CAPACITORES SERIE EN  
RELEVADORES DE DISTANCIA**

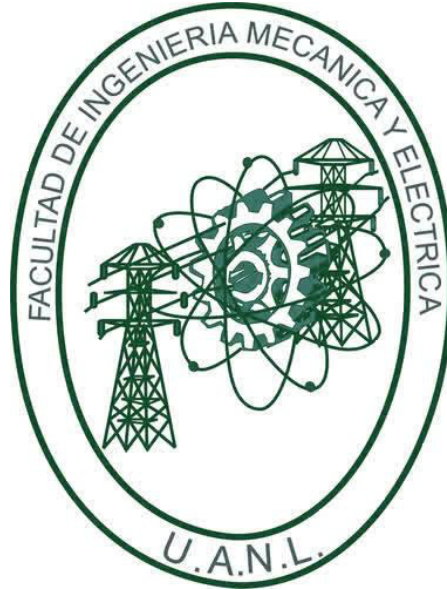
**P R E S E N T A**

**ING. DIEGO ALEJANDRO ORTIZ VILLEGAS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS  
ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**AGOSTO, 2017**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TESIS**

**COMPENSACIÓN DEL EFECTO DE CAPACITORES SERIE EN  
RELEVADORES DE DISTANCIA**

**P R E S E N T A**

**ING. DIEGO ALEJANDRO ORTIZ VILLEGAS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS  
ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

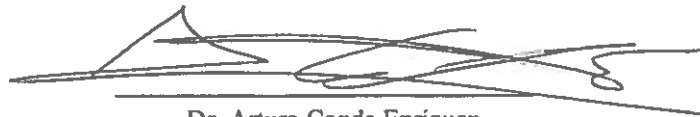
**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

**AGOSTO DE 2017**

Universidad Autónoma de Nuevo León Facultad  
de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Subdirección  
de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis **COMPENSACIÓN DEL EFECTO DE CAPACITORES SERIE EN RELEVADORES DE DISTANCIA**, realizada por el alumno Diego Alejandro Ortiz Villegas, con número de matrícula 1831346, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica.

El Comité de Tesis



Dr. Arturo Conde Enríquez  
Director



Dra. Gina Maria Idarraga Ospina  
Revisor



Dr. Emilio Barocio Espejo  
Revisor

Vo.Bo



Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Agosto 2017.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres por apoyarme aun en la distancia, estando siempre al pendiente de mis avances en este ciclo de mi vida.

Al Dr. Arturo Conde Enríquez por permitir ser mi asesor, brindarme su apoyo y motivación para la finalización de este trabajo y sobre todo su gran asesoría en esta tesis de investigación y conocimiento en periodo de clases.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo y confianza brindado para mi realización de estudios de Maestría.

A mis profesores de estudios de Posgrado, por compartir sus conocimientos dentro y fuera del periodo de clases.

A mis compañeros de Maestría, Nohemí, Ernesto, Elvir, Roberto, Daniel y Saúl por su apoyo y amistad.



## **RESUMEN**

### **COMPENSACIÓN DEL EFECTO DE CAPACITORES SERIE EN RELEVADORES DE DISTANCIA**

Publicación No.

Diego Alejandro Ortiz Villegas, Ing. Mecánico Eléctrico

Universidad Autónoma de Nuevo León, 2017

Profesor Asesor: Dr. Arturo Conde Enríquez

En base al incremento constate de la demanda eléctrica que se tiene en las redes eléctricas ha vuelto a los sistemas de potencia más complejos y difíciles de operar, se ha impulsado el uso de capacitores serie para incrementar el flujo de la potencia transmitida; dando solución parcial al problema de congestión de redes. Es necesario ponderar y evaluar tanto el incremento en los valores de corriente resultantes por un cortocircuito en líneas compensadas como el error en el alcance de los relevadores de distancia.

La presencia del capacitor serie introduce un comportamiento transitorio en las señales de voltaje y corriente afectando la impedancia medida por el relevador de distancia. Por ello, es de suma importancia conocer los problemas que estos generan en los valores de corriente y voltaje medidos por los relevadores afectando el alcance en condiciones de falla. El alcance de los relés de distancia puede experimentar dos problemas principales:

1. La reducción de la inductancia en serie de la línea, la cual se desplaza hacia abajo en el plano complejo impedancia.
2. La resonancia subsíncrona que pueden introducir retrasos notables en la respuesta de los métodos de estimación de fasores digitales.

Este trabajo de tesis está enfocado en la compensación de los errores de impedancia medidos por relevadores de distancia, provocados por la conexión de capacitores serie en líneas de transmisión. Se caracteriza el error en la impedancia aparente medida por un relevador de distancia, la compensación de la impedancia aparente se realiza mediante la modificación de las señales de operación y polarización del relevador; es considerada la operación dinámica del MOV y su impacto en la operación del relevador de distancia. La impedancia medida por el relevador de distancia al tener instalado el capacitor provoca un sobrealcance en la característica de operación, y en algunos casos la inversión de voltaje. En arreglo de líneas paralelas estos efectos presentan una componente aleatoria y dependiente de la ubicación de la falla; se presenta un problema especial en fallas a tierra, ocasionando que la protección de distancia opere de forma no deseada.

Los resultados obtenidos en base a simulaciones y eventos reales muestran que la estrategia propuesta que consistente en modificar las señales de entrada a los comparadores, es efectiva ya que se logró mitigar los errores en la operación del relevador de distancia como son la inversión de voltaje y el sobre y sub alcance.

## **DEDICATORIA.**

A mis padres Isabel y Salvador por ser parte fundamental de mi crecimiento académico y vida personal, por el apoyo brindado, confianza y cariño en toda mi vida. Por darme la vida, por sus consejos y motivaciones de perseverancia, por sus valores inculcados para seguir siempre con un objetivo hacia adelante y sobre todo por su amor.

A mis hermanos Mariana, Mario y Orlando por apoyarme y estar al pendiente de mí en todo momento como familia.

# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	4
RESUMEN .....	5
DEDICATORIA.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	10

## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción. ....	13
1.2 Definición del problema. ....	14
1.3 Justificación. ....	15
1.4 Estado del arte.....	17
1.4.1. Protección en líneas con compensación serie. ....	18
1.4.2. Protección en líneas con acoplamiento mutuo.....	21
1.5 Hipótesis. ....	22
1.6 Objetivos de la tesis. ....	22
1.7 Estructura de la tesis. ....	23

## CAPÍTULO 2. MODELADO DEL RELEVADOR DE DISTANCIA

2.1 Introducción. ....	25
2.2 Zonas de operación. ....	26
2.3 Señales eléctricas de entrada del relevador de distancia.....	27
2.4 Procesamiento digital de las señales. ....	28
2.5 Comparadores de relevador de distancia. ....	32
2.6 Características del relevador de distancia. ....	33
2.7 Conclusiones. ....	37

## CAPÍTULO 3. COMPENSACIÓN SERIE Y ACOPLAMIENTO MUTUO

3.1 Compensación serie. ....	38
3.2 Configuración del capacitor. ....	40
3.3 Operación del capacitor serie.....	42
3.4 Efectos del capacitor en el relevador. ....	45
3.4.1 Sobrealcance. ....	46
3.4.2 Inversión de voltaje y corriente.....	56
3.5 Acoplamiento mutuo.....	64
3.6 Conclusiones. ....	72

## CAPÍTULO 4. PROPUESTA MITIGACION DEL PROBLEMA

4.1 Introducción. ....	73
4.2 Estado del arte de característica adaptable.....	73
4.3 Mitigación del efecto de sobrealcance analizando la señal de operación. ....	83
4.4 Conclusiones. ....	89

## CAPÍTULO 5. PRUEBAS FUNCIONALES

5.1 Introducción. ....	90
5.2 Prueba al primer sistema con compensación serie al inicio de la línea. ....	90
5.3 Prueba al segundo sistema con compensación serie al inicio de la línea.....	92
5.4 Prueba al segundo sistema pero con compensación serie a mitad de la línea.....	93
5.5 Caso de estudio con diferentes niveles de compensación.....	94
5.6 Mitigación del efecto de inversión de voltaje. ....	96
5.7 Caso de estudio con adaptación dinámica. ....	97
5.8 Eventos reales. ....	100
5.9 Conclusiones. ....	103

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Introducción. ....	104
6.2 Conclusiones generales. ....	105
6.3 Aportaciones. ....	106
6.4 Trabajos futuros. ....	107

REFERENCIAS.....	108
------------------	-----

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1 Parámetros de CFE con incremento de potencia.....	16
Figura 2.1. Señales de entrada de corriente y voltaje. ....	25
Figura 2.2. Zonas de operación.....	27
Figura 2.3. Estructura del procesamiento de las señales.....	29
Figura 2.4. Respuesta de frecuencia de filtros digitales.....	30
Figura 2.5. Señal fundamental de corriente. ....	30
Figura 2.6. Datos muestreados de señales en un ciclo.....	31
Figura 2.7. Determinacion de fasores. ....	31
Figura 2.8. Comparadores de señal.....	32
Figura 2.9. Tipo impedancia.....	34
Figura 2.10. Tipo Mho. ....	34
Figura 2.11. Tipo impedancia ángulo.....	35
Figura 2.12. Tipo Mho desplazada. ....	35
Figura 2.13. Tipo cuadrilateral.....	36
Figura 2.14. Diagrama de estimación fasorial. ....	37
Figura 3.1. Impedancia vista por el relevador con y sin compensación. ....	38
Figura 3.2. Configuración de Compensación serie.....	39
Figura 3.3. Compensador serie. ....	40
Figura 3.4. Arreglo de capacitor en serie.....	41
Figura 3.5. Modelo de compensación serie monofásico.....	43
Figura 3.6. Señales de corriente y voltaje del capacitor serie en servicio. ....	44
Figura 3.7. Efecto de Sobrealcance.....	45
Figura 3.8. Sobrealcance en el relevador debido a la compensación serie.....	46
Figura 3.9. Sistema de prueba con línea compensada en serie. ....	47
Figura 3.10. Sistema de prueba equivalente. ....	48
Figura 3.11. a. Trayectoria de impedancia sin compensación.	
b. Con compensación al inicio de la línea.....	49
Figura 3.12. Voltaje de capacitor serie en servicio.....	50
Figura 3.13. Operación del relevador a. Sin compensación.	
b. Con compensación. ....	50
Figura 3.14. Segundo sistema equivalente de prueba. ....	51
Figura 3.15.a. Trayectoria de impedancia sin compensación.	
b. Con compensación al inicio de la línea.....	52

Figura 3.16. Operación del relevador a. Sin compensación.	
b. Con compensación al inicio de la línea.....	53
Figura 3.17. Trayectoria de impedancia en el relevador con compensación a mitad de la línea. ....	53
Figura 3.18. Compensaciones diferentes. ....	54
Figura 3.19. Ilustración del alcance adaptable dependiente de la corriente.....	56
Figura 3.20. Diagrama de reactancia de una red compensada en serie.....	57
Figura 3.21. Inversión de voltaje por compensación serie [15].....	58
Figura 3.22.a. Simulación sin capacitor serie.	
b. Simulación de inversión de voltaje. ....	59
Figura 3.23. Señal de voltaje invertido. ....	59
Figura 3.24. a. Voltaje en capacitor serie. b. Energía disipada en MOV.	
c. Sistema de protección. ....	60
Figura 3.25. a. Voltaje en capacitor serie. b. Corriente en MOV. ....	61
Figura 3.26. Reducción de la primera zona. ....	63
Figura 3.27. Sistema general de líneas en paralelo con acoplamiento mutuo ....	66
Figura 3.28. Circuito equivalente del sistema general [4]. ....	67
Figura 3.29. Alcance del relevador con característica mho a. Con acoplamiento mutuo. b. Con acoplamiento mutuo y compensación serie en diferentes buses. 88	
Figura 3.30. Líneas paralelas con 1 bus común y acoplamiento mutuo [4].....	68
Figura 3.31. Circuito equivalente con un bus común y acoplamiento mutuo.....	69
Figura 3.32. Alcance del relevador con característica mho a. Con acoplamiento mutuo.b. Con acoplamiento mutuo y compensación serie con 1 bus en común. 69	
Figura 3.33. Líneas paralelas con ambas terminales y acoplamiento mutuo.....	70
Figura 3.34. Circuito equivalente de líneas paralelas con ambas terminales.....	70
Figura 3.35. Alcance del relevador con característica mho a. Con acoplamiento mutuo.b. Con acoplamiento mutuo y compensación serie con 2 bus en común. 71	
Figura 4.1. Alcance máximo de la primera zona con grado de compensación...	74
Figura 4.2. Mho polarizado para fallas hacia adelante. ....	75
Figura 4.3. Característica mho dinámica en plano de voltaje. ....	77
Figura 4.4. Característica mho dinámica en plano de impedancia. ....	78
Figura 4.5. Característica mho dinámica. ....	79
Figura 4.6. Elemento de respuesta. a. para falla BC hacia adelante.	
b. falla de fase a tierra. ....	80
Figura 4.7. Diagrama de bloque de voltaje polarizado de secuencia positiva....	81
Figura 4.8. Ajuste convencional y reducción de la primera zona. ....	84

Figura 4.9. Voltaje en el <i>MOV</i> y capacitor serie.....	85
Figura 4.10. Tiempo de operación del <i>MOV</i> .....	86
Figura 4.11. Corriente del <i>MOV</i> .....	86
Figura 4.12. Señal de impedancia en el sistema. ....	87
Figura 4.13. Operación del <i>MOV</i> y el capacitor. ....	88
Figura 4.14. a. Alcance con <i>MOV</i> . b. Alcance con capacitor .....	88
Figura 5.1. Operación de relevador del primer sistema a. Convencional. b. Propuesto.....	91
Figura 5.2. Operación de relevador propuesto en el primer caso. ....	91
Figura 5.3. Operación de relevador del segundo sistema con compensación a inicio de la línea a. Convencional. b. Propuesto. ....	92
Figura 5.4. Operación de relevador propuesto en el segundo caso.....	93
Figura 5.5. Operación de relevador del segundo sistema con compensación a mitad de la línea con característica convencional y propuesta. ....	93
Figura 5.6. Impedancia vista por el relevador a. Sin compensación. b. Con diferentes niveles de compensación. ....	94
Figura 5.7. Reducción de la característica con 30% de compensación. ....	95
Figura 5.8. Reducción de la característica con 40% de compensación. ....	95
Figura 5.9. Reducción de la característica con 60% de compensación. ....	96
Figura 5.10.a. Simulación sin capacitor serie. b. Simulación de inversión de voltaje. ....	97
Figura 5.11. Operación del relevador con a. <i>MOV</i> fuera de servicio. b. <i>MOV</i> en servicio. ....	98
Figura 5.12. Operación del relevador dinámico.....	98
Figura 5.13. Característica dinámica. ....	99
Figura 5.14. Operación del relevador con <i>MOV</i> y capacitor en servicio a través del tiempo. ....	99
Figura 5.15. Señal de corriente en el primer evento real. ....	100
Figura 5.16. Señal de voltaje en el primer evento real.....	100
Figura 5.17. Característica de operación en el primer evento real.....	101
Figura 5.18. Señal de corriente en el segundo evento real.....	101
Figura 5.19. Señal de voltaje en el segundo evento real. ....	101
Figura 5.20. Característica de operación en el segundo evento real. ....	102
Figura 5.21. Señal de corriente en el tercer evento real.....	102
Figura 5.22. Señal de voltaje en el tercer evento real. ....	102
Figura 5.23. Característica de operación en el tercer evento real. ....	103



# **CAPITULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 INTRODUCCIÓN.**

Las líneas de transmisión son el elemento principal para transportar energía eléctrica de un lado a otro. Debido a esto, es de suma importancia proteger una línea de transmisión en caso de que exista una falla, como también se debe tomar en consideración las características de la línea, los ajustes y coordinación de los relevadores de protección para tener una seguridad del sistema.

La principal característica de la protección es detectar alguna anomalía en el sistema de potencia, tratándose de un corto circuito o una operación de manera anormal, la cual debe poner fuera de servicio el elemento que pueda causar daño la operación efectiva del sistema eléctrico. El equipo de protección utiliza interruptores que son capaces de desconectar las fallas; presentado esto, el funcionamiento de los relevadores debe indicar la localización y tipo de falla.

Para las líneas de transmisión se emplea la protección de distancia, la cual detecta los disturbios en la red por medio de relevadores, se realiza una evaluación de la distancia desde la ubicación del relevador a la localización de la falla. La protección debe ser capaz de discernir entre un sistema saludable y una condición de falla; no debe operar cuando se presente una oscilación de potencia cuando el sistema pueda ser capaz de recuperar.

Por otro lado, para mejorar el funcionamiento de los sistemas de transmisión se ha empleado la compensación serie, la cual consta del uso de capacitores serie para aumentar el flujo de transferencia de potencia. Los capacitores son instalados

en serie junto con los conductores de fase a lo largo de la línea, para así reducir los efectos de la inductancia en las líneas de transmisión.

La presencia de líneas en paralelo tiende a reforzar los enlaces en la red con la finalidad de incrementar la capacidad de transmisión de energía eléctrica. Se ha observado que en las líneas paralelas se presenta el acoplamiento mutuo entre circuitos, este acoplamiento puede ser entre fases o entre fase y tierra.

En este capítulo se presenta de manera generalizada el problema que se tiene en la protección de distancia para líneas de transmisión con compensación serie y cuando se tiene un arreglo de líneas paralelas. Son mencionados algunos de los desarrollos que se han implementado en el relevador de distancia. Finalmente, son planteados los objetivos de la tesis y se presenta la estructura de la tesis.

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.**

El aumento de las potencias transmitidas, la longitud de las líneas de transmisión ha vuelto a los sistemas de potencia más complejos y difíciles de operar [5, 10]. Sin embargo, es de suma importancia que cualquier sistema de potencia funcione de manera satisfactoria aunque se presente cualquier tipo de disturbio. Sin embargo, con el crecimiento constante de la demanda eléctrica es necesario mejorar la capacidad de transferencia de potencia de las plantas de generación a los consumidores de manera más eficiente y económica. Por lo que se ha llevado a cabo mediante el uso de uso de construcción de líneas, dispositivos basados en electrónica de potencia como son los FACTs y Capacitores Serie [8, 12].

Para este trabajo de investigación se toma en cuenta la compensación serie para mejorar la transmisión de energía eléctrica, mediante el uso de capacitores serie por ser un método más económico, el cual nos proporcionan grandes ventajas para incrementar la potencia de transmisión, pero se tiene el inconveniente que los valores de falla son incrementados [18, 34]. Además, la presencia del capacitor

serie introduce un comportamiento transitorio en las señales de voltaje y corriente afectando la impedancia medida por el relevador de distancia [8, 10]. El alcance de los relés de distancia puede experimentar dos problemas principales:

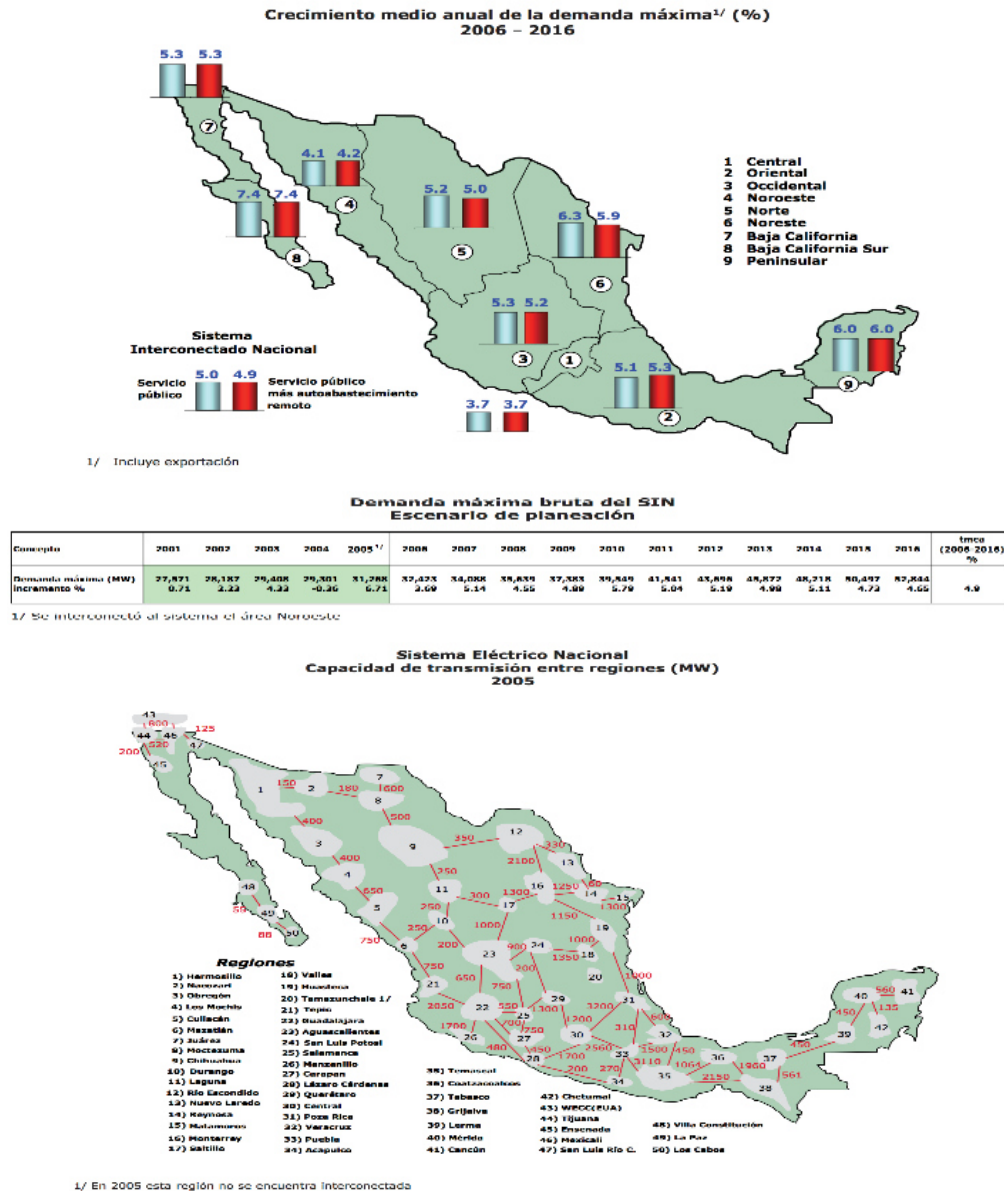
- [1] La reducción de la inductancia en serie de la línea, la cual se desplaza hacia abajo en el plano complejo impedancia [8, 20]. La direccionalidad del relevador de distancia en las líneas compensadas en serie puede perderse debido a la inversión de voltaje o corriente [1, 5, 6, 10].
- [2] La resonancia subsíncrona que pueden introducir retrasos notables en la respuesta de los métodos de estimación de fasores digitales [9]. Cuando un capacitor en serie y su protección contra sobretensiones (*MOV*) se introducen en la línea, la respuesta transitoria de la red eléctrica es distorsionada y el alcance del relevador puede ser afectado [9, 10, 15].

Este trabajo es enfocado en las líneas de transmisión con capacitores serie donde se imponen efectos significativos tanto en la direccionalidad y en el alcance de los relevadores de distancia. En arreglo de líneas paralelas estos efectos se vuelven más graves [10, 28], se presenta un problema especial en fallas a tierra, debido a que la corriente de secuencia cero se divide en las dos líneas en paralelo, ocasionando que la protección de distancia opere de forma no deseada, introduciendo errores en la impedancia medida por los relés de distancia [12, 29]. Debido a lo anterior, se proponen modificaciones de diseño en los relevadores de distancia y esquemas adaptables de protección con la finalidad de compensar los errores de impedancia medida por los relevadores en estado transitorio.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN.**

En base a la demanda eléctrica que se tiene, las compañías eléctricas han llevado a la tarea de instalar los capacitores serie para el aumento de la transferencia. A continuación se muestran parámetros de CFE con crecimiento de la demanda máxima, así como también se muestra la capacidad de transmisión

eléctrica entre regiones donde se tiene una mayor necesidad de incremento de energía ya que se han violado los límites de transmisión de potencia, estas ubicaciones son lugares estratégicos para que los capacitores serie sean instalados.



está planeando instalar compensación serie en varias líneas de transmisión de la red de 735 kV. A continuación se presentan en la tabla 1.1 equipos instalados a nivel mundial:

Tabla 1.1 Equipos de compensación serie instalados a nivel mundial.

Transmisión	Aplicación
Cross Texas Transmission. • Banco trifásico: 2 x 716 Mvar. • Subestación: Turkey, Texas – Estación de cruce 1 y 2	Compensación del 50% en dos líneas de transmisión desde "Tule Canyon a Tesla.
Electric Transmission Texas, LLC. • Subestaciones Edison, Gauss, Kirschhoff, y Orsted.	Ocho bancos de compensación serie ubicados en cuatro diferentes sitios en las nuevas líneas de 345kV en las regiones de CREZ en todo Texas.
Electricity of Vietnam. • 18 bancos desde 2012-2016. • 6,588 total de Mvar en operación.	Aumento en la capacidad de transferencia de potencia de líneas de transmisión existentes.
Bonneville Power Administration (BPA). • Banco trifásico: 2 x 675 Mvar. • Subestaciones: Bakeoven 1 y 2.	Proporcionar potencia confiable y eficiente a 500 kV a través de California-Oregon Intertie.

En vista que se está llevado a cabo la instalación de los capacitores serie para el aumento de transferencia de energía, es de suma importancia conocer los problemas que estos generan en los valores de corriente y voltaje medido por los relevadores de distancia afectando el alcance en condiciones de falla.

#### 1.4 ESTADO DEL ARTE.

En los presentes días el escenario de la demanda eléctrica ha resultado en aumento, lo que ha llevado a los ingenieros de potencia a generar y transferir la máxima potencia posible a través de la línea de transmisión, es decir, hasta los límites térmicos, lo que conduce hacia la instalación de dispositivos de compensación [8]. La literatura ha mostrado que las líneas compensadas en serie han sido de gran interés para los ingenieros de protección y ha sido tema de muchos trabajos por varios años, es por ello que se realiza un estado del arte del efecto en el relevador de distancia por la compensación serie y acoplamiento mutuo, donde dichos efectos han sido investigados en años anteriores.

#### **1.4.1. Protección en líneas con compensación serie.**

En primer punto se hablara del efecto por la compensación serie, donde es de entendimiento que los problemas de transmisión asociados con las líneas compensadas en serie es mucho más difícil que la transmisión en línea no compensada [5]. Consecuentemente del estudio de la compensación serie, se sabe que esta permite mejorar el perfil de voltaje y optimizar el flujo de corriente en líneas de transmisión conectadas en paralelo, mediante el uso de capacitores operando en serie con conductores en la línea [12]. Sin embargo, a lo largo de las investigaciones hechas en años posteriores, se ha observado que cuando se instalan los capacitores en serie y sus dispositivos de protección de sobrevoltaje (Varistores de óxido metálico, *MOVs* y/o entrehierros), en líneas de transmisión, estos crearan varios problemas a los relevadores de protección de distancia [8].

Adicionalmente, hay problemas que determinan si la compensación en serie se encuentra dentro del lazo de falla durante la falla de fase a tierra, causando el sobrealcance en relevadores de distancia y como consecuencia, un problema de detección de falla [1]. Por motivos como los mencionados anteriormente, es de suma importancia estudiar este problema y llevar a cabo una solución para disminuir la cantidad de operaciones erróneas en los relevadores de distancia al tener la compensación en las líneas de transmisión.

Se han realizado considerables investigaciones para el desarrollo de los sistemas de los relevadores para la protección en líneas de transmisión con compensación serie. Los enfoques disponibles en términos generales pueden ser clasificados en las siguientes categorías:

- La aplicación de características dinámica de la impedancia de acuerdo con la presencia de compensador en serie en el circuito de falla en [16].
- El uso de la polarización de memoria para eliminar la alteración de voltaje a través de la compensación en [17].

- Desarrollo de un modelo matemático del dispositivo de compensación para estimar el nivel de impedancia durante un curso de la falla es presentado en [18].

En años anteriores, investigadores han implementado las técnicas de Inteligencia Artificial (AI) como herramientas de reconocimiento de patrones para el análisis de falla mostradas en [19, 21, 25]. Uno de los efectos debido a la presencia de la compensación serie se presentó en [10] donde se observó el efecto de “inversión de voltaje e inversión de corriente”. Este tipo de problemas causados por inversión de voltaje y corriente también pueden ser resueltos por esquemas de protección existentes presentados en [39, 40, 41, 42].

También se ha observado en investigaciones realizadas que el relevador altera la impedancia característica de acuerdo al tamaño, forma y reactancia del compensador. Es por ello que en el trabajo realizado por Mandour y El-Alaily [11], se utilizó la existencia de sub-armónicos en corriente de falla para investigar la participación del compensador en corriente de falla. Srivani y Vittal [16] presentaron un algoritmo para la generación de la variación de la impedancia característica de acuerdo al nivel de la compensación fija.

Como bien ha sido estudiado, el esquema de protección de distancia puede calcular la impedancia de falla engañosamente debido a la caída de voltaje del compensador. Uno de los métodos para mitigar este problema es el desarrollo de un modelo de impedancia equivalente del compensador para los cálculos. Goldsworthy [18] presento un modelo aplicable SC-MOV para el sistema de cálculos de los parámetros en condiciones de falla. Se encuentran modelos que son bastante útil en los cálculos de impedancia SC-MOV y, por lo tanto, para la estimación de tensión a través del compensador [8, 16, 44, 45].

Yu y Gu [46] presentaron un esquema de protección de línea de transmisión compensada en serie basada en el filtro de Fourier para la eliminación simultánea de componentes de frecuencia sub-síncronos para desarrollar una componente de frecuencia fundamental clara en un tiempo rápido. Para el caso de la protección de líneas compensadas se ha aplicado la Transformada Wavelet (WT) para la identificación de zona fallada usando la Wavelet madre 'db4' y clasificación de fallas con 'Haar' como wavelet madre que fue propuesta por Megahed en [47]. En otro trabajo presentado por Dash y Samantray [48] presento un algoritmo para el tipo de falla y clasificación de zonas usando el análisis de WT para una línea de transmisión compensada controlable.

La ANN (red neuronal artificial) es considerada como uno de los mejores métodos para voltaje y corriente para la clasificación de patrones [48, 50] para análisis de falla. Xuan en [51] aplico ANN para el reconocimiento de patrones basados en la retransmisión adaptiva para líneas de transmisión compensada en serie.

Se han propuesto varios algoritmos de localización de fallas, en uno de los trabajos realizados, Girgis en [52] aplico el método desarrollado de Carson para los cálculos de la impedancia de falla con estimación adicional de la impedancia equivalente del compensador. Se ha propuesto un algoritmo de localización de falla en un solo extremo usando las coordenadas de fasores en [53].

Además, relevadores numéricos han sido equipados con una impedancia característica adaptativa, donde los elementos de fase y de tierra pueden ser ajustados a la característica cuadrilateral o característica mho. El ejemplo de implementación y funcionamiento del relevador puede ser visto en [54].



#### **1.4.2. Protección en líneas con acoplamiento mutuo.**

Como se mencionó anteriormente, otro de los efectos que afectan a la protección de distancia es el acoplamiento mutuo en líneas paralelas, donde se ha observado que los problemas se amplían debido a la configuración de línea paralela. Por lo tanto, todas estas condiciones también deben ser consideradas durante el diseño de la protección de la línea de transmisión compensada serie en paralelo.

Cuando utilizamos la protección para líneas paralelas, el funcionamiento de relevadores de distancia convencional es adversamente afectado por el efecto de acoplamiento mutuo entre las líneas, cual varía con la condición de operación de la línea, configuración del bus y condiciones de falla [29]. Los ajustes para relevadores de distancia convencional deben ser selectos para permitir la operación de sobrealcance o subalcance en diferentes situaciones de operación.

Se han realizado varios esquemas teóricos o prácticos en la literatura para conseguir un sistema de protección confiable para líneas de transmisión de doble circuito. Un nuevo algoritmo de compensación de secuencia cero, para relevadores de distancia en líneas paralelas es propuesto en [33]. Un algoritmo para la localización de fallas para líneas de transmisión paralelas compensadas en serie con fasor síncrono puede ser visto en [55]. En [12] se presenta un modelo del relevador Mho, para evaluar el funcionamiento del esquema de protección de distancia.

También se encuentran algunas soluciones propuestas en [56]-[60]. Se presentó en [56] un esquema adaptativo de protección de distancia, en el cual un factor de corrección, basado en la información del sistema de la línea protegida bajo diferentes estados de operación, donde fue usado en el cálculo de la impedancia. Un esquema de protección de línea paralela basado en onda viajera fue investigado en [57]. En [58], una comparación de corriente de fase entre dos circuitos y detección de nivel de corriente de secuencia positiva fueron utilizados

conjuntamente en el cálculo de impedancia compensada con corriente de secuencia cero con líneas en paralelo. En ambas investigaciones [59] y [60] se exploró el uso de todas las señales de corriente voltaje de líneas en paralelo en la ubicación del relevador para formar un esquema de protección integrado.

## **1.5 HIPÓTESIS**

La configuración de líneas de transmisión con compensación serie y con acoplamiento mutuo afectan los valores de corriente y voltaje medidos por los relevadores de distancia. Los errores en la impedancia aparente del relevador de distancia pueden provocar la pérdida de selectividad o sensibilidad para la detección de fallas.

La caracterización dinámica de relevadores, mediante el re-diseño de comparadores, el uso de filtros digitales no convencionales y la aplicación de esquemas adaptables de protección mitigaran los errores de impedancia aparente medidos por los relevadores de distancia de fase y tierra.

## **1.6 OBJETIVOS DE LA TESIS**

Como ha sido mencionado anteriormente, el funcionamiento del relevador de distancia es afectado por la compensación serie en la línea, debido a esto se tiene como objetivo principal en este trabajo mitigar el efecto de capacitores serie en la impedancia medida por relevadores de distancia de fase y tierra, además de eso, también considerar el arreglo de líneas de transmisión en paralelo. Dado que en el arreglo de líneas en paralelo, se debe llevar a cabo la compensación del efecto de acoplamiento mutuo en relevadores de distancia de tierra.

Se es llevado a cabo la siguiente metodología para este trabajo:

- Obtener un modelo dinámico del relevador de distancia de fase y tierra mediante el uso de comparadores de fase.

- Implementar filtros digitales no convencionales que eliminen las componentes frecuenciales no fundamentales de las señales de voltaje y corriente medidos por el relevador.
- Diseñar un comparador de fase que compense la inversión de voltaje presente por la conexión del capacitor serie.
- Montar un sistema de pruebas mediante simulaciones digitales en herramientas computacionales en tiempo real para la validación de los algoritmos propuestos.

## **1.7 ESTRUCTURA DE LA TESIS.**

La presente tesis se encuentra estructurada en seis capítulos, donde el contenido de los capítulos se describe de la siguiente manera.

En el capítulo 1 se detalla una introducción general del tema a tratar, se es presentado el problema que se tiene en la operación del relevador de distancia al tener compensación serie, caracterización y la importancia del ajuste en el modelado, como también los objetivos principales de la tesis.

En el capítulo dos se presenta el modelado del relevador de distancia, las características para el diseño de los relevadores, la estimación fasorial de las señales de entrada, así como también los tipos de comparadores para la operación y decisión de disparo.

En el capítulo tres es presentada la caracterización del problema en la operación del relevador de distancia al tener instalado el capacitor serie para compensación en el sistema de potencia, así como también al tener líneas paralelas junto con la compensación. De igual manera se realizó el modelado del capacitor serie junto con sus dispositivos de protección.

En el capítulo cuatro se describen algunas de las funciones adaptables que se han propuesto de la protección de distancia para eliminar o mitigar el efecto de la compensación serie, además de la implementación de las mismas. Se menciona las ventajas y desventajas que se tienen de la protección dinámica en comparación con la convencional. También se propone un ajuste del relevador de distancia en función a su señal de operación para mitigar el efecto de sobrealcance.

En el capítulo cinco se simulan pruebas con los sistemas implementados en el capítulo cuatro y además con casos reales de sistemas de potencia, con la finalidad de obtener la validación de la propuesta del relevador de distancia.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones generales acerca de la tesis, se establecen las aportaciones y las contribuciones logradas, así como también trabajo futuro.

## CAPÍTULO 2.

### MODELADO DEL RELEVADOR DE DISTANCIA.

#### 2.1 INTRODUCCIÓN.

La protección de distancia es utilizada, para proteger las líneas de transmisión de disturbios o fallas que sean presentadas en el sistema, actúa como principal protección de las líneas de transmisión y proporciona protección de respaldo a elementos en la red, como buses, generadores, transformadores, motores y adicionalmente alimentadores. La protección de distancia tiende a ser más rápida y selectiva que una protección de sobrecorriente.

Básicamente, la protección es compuesta por relevadores de distancia los cuales deben ser capaz de discernir entre una falla en la red o un comportamiento que se mantiene en buen estado. Su operación está basada en la impedancia de la línea, la cual resulta de la medición de dos señales de entradas, voltaje  $V_r$  y corriente  $I_r$ , ( $Z = V_r/I_r$ ).

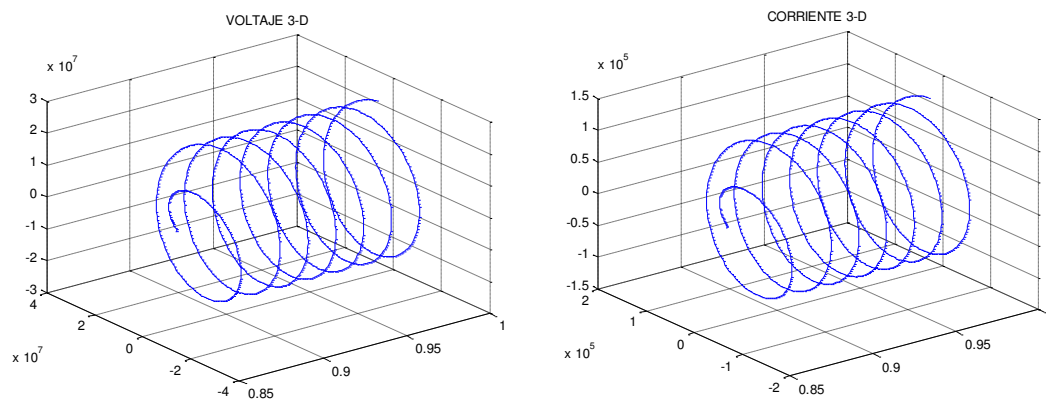


Figura 2.1. Señales de entrada de corriente y voltaje.

La impedancia medida es comparada con la impedancia de la línea conocida. Si la impedancia medida es más pequeña que la impedancia de la línea; se detecta una falla interna en la línea de transmisión entre el relevador y el punto de alcance, entonces una orden de disparo se envía al interruptor automático [2].

La impedancia medida es resultado del lugar donde se presentó la falla y la ubicación del relevador, lo que permite conocer si la falla se encuentra dentro de la zona de protección del relevador [3]. Durante la condición de falla esta impedancia es de secuencia de fase positiva.

En este capítulo se presenta las características más representativas del relevador de distancia, así también es presentada la metodología para obtener estas características, a partir de comparadores los cuales fueron desarrollados por medio del lenguaje de programación *Matlab®*. La simulación fue implementada en *Simulink®* donde fueron utilizados valores reales. Se presentan las pruebas que se realizaron al relevador de distancia.

## **2.2 ZONAS DE OPERACIÓN.**

La protección de distancia está ajustado a tres zonas de operación para proteger una porción específica del sistema de transmisión, por ello se emplean los relevadores de forma que el sistema quede dividido en tres zonas con tiempos de operación diferente. En la figura 2.2 se muestra un arreglo de las tres zonas en una característica cuadrilateral del relevador de distancia.

Para la primera zona del relevador de distancia el disparo es instantáneo al presentarse la falla, debido a que es la principal zona a proteger de la transmisión de la línea, puede ser ajustada dentro de 80-90% de la longitud de la línea. El ajuste es realizado a menos del 100% de la longitud de la línea para evitar el sobrealcance del relevador en la siguiente sección de la línea debido a transitorios, errores en los transformadores de instrumento y errores en el propio relevador.

Si la falla continua, el alcance se extiende a otras zonas de operación las cuales son ajustadas al relevador de distancia para operar más allá del final de la línea de transmisión. La segunda zona cubre la sección completa de la línea de transmisión para ser protegida, agregando cerca de un 50% de la siguiente sección de la línea, teniendo por lo tanto una segunda zona ajustada alrededor de 120-150% del total de longitud de la línea.

La tercera zona del relevador de distancia es extendida para la primera y la segunda línea de transmisión. Esta se encuentra coordinada con respecto a la distancia y el tiempo con la segunda zona del circuito vecino. Por lo general, el tiempo del relevador de distancia en su tercera zona es de aproximadamente 0.5-1 segundo, y con un ajuste de distancia entre 120-180% de la longitud de la línea, con el fin de proporcionar un respaldo total para la línea.

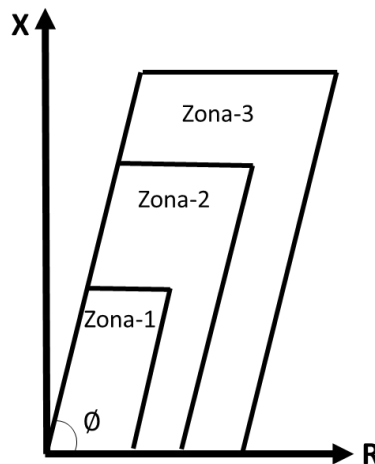


Figura 2.2. Zonas de operación

### 2.3 SEÑALES ELÉCTRICAS DE ENTRADA DEL RELEVADOR DE DISTANCIA.

La impedancia medida por el relevador de distancia es realizada por seis elementos del relevador, tres relevadores son usados para mediciones de falla entre fases y otros tres relevadores para mediciones de falla de fase a tierra [3]. Los tres elementos de medición para la protección de falla de fase son (AB), (BC) y (CA); los cuales deben operar correctamente para corto circuitos trifásicos, fase

a fase y doble fase a tierra en base a las señales de entrada de voltaje  $V_r$  y corriente  $I_r$ . A continuación en la tabla 2.1 se muestra las señales eléctricas de entrada para cada elemento del relevador de distancia.

Tabla 2.1. Señales de entrada para fallas.

Unidad	Voltaje ( $V_r$ )	Corriente ( $I_r$ )
<b>Fase-Fase</b>		
<b>AB</b>	$V_a - V_b$	$I_a - I_b$
<b>BC</b>	$V_b - V_c$	$I_b - I_c$
<b>CA</b>	$V_c - V_a$	$I_c - I_a$
<b>Fase-Tierra</b>		
<b>AT</b>	$V_{an}$	$I_{an} + k_0 * I_0$
<b>BT</b>	$V_{bn}$	$I_{bn} + k_0 * I_0$
<b>CT</b>	$V_{cn}$	$I_{cn} + k_0 * I_0$

Las señales de entrada  $I_r$  y  $V_r$  son estimadas por estimación fasorial, es común el uso de filtros Fourier o filtro Coseno, para obtener la frecuencia fundamental del fasor.

## 2.4 PROCESAMIENTO DIGITAL DE LAS SEÑALES.

El relevador de distancia cuenta con una lógica programable con dos escenarios de filtrado (ver figura 2.3) donde se procesa las señales discretizadas de voltaje ( $V_r$ ) y corriente ( $I_r$ ) suministradas al relevador de distancia para detectar y eliminar las condiciones anormales de operación del sistema eléctrico, ya sea el ruido, componente DC y otras frecuencias no deseadas que pueden afectar a las condiciones del relevador, para que por consiguiente sean ingresadas a los módulos de localización de fallas y al relevador de distancia libres de componentes que puedan afectar la estimación de dichos módulos.



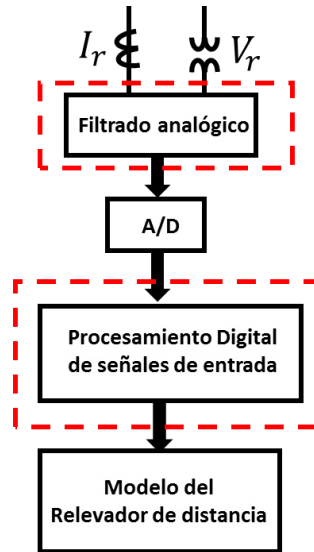


Figura 2.3. Estructura del procesamiento de las señales.

En el procesamiento de las señales se utilizan los transformadores de corriente (TC's) y/o transformadores de potencial (TP's) para obtener las señales de la magnitud de corriente y voltaje del sistema, estas señales pasan a través de un filtro anti-aliasing, el cual es un filtro de pasa baja con una frecuencia máxima de corte determinada por la tasa de muestreo del relevador [22]. Las señales de salida del filtro, pasan por un buffer de datos para obtener el proceso de muestreo y retención.

Estos dos escenarios de filtrado mencionados anteriormente son: filtrado analógico y filtrado digital como es mostrado en la figura 2.3.

- En el filtrado analógico, se utilizan filtros pasa-baja sintonizada a la frecuencia fundamental para eliminar las frecuencias no deseadas, ya sean mayores o menores que la frecuencia fundamental, figura 2.4.
- Sin embargo, después del filtro analógico la señal es digitalizada por medio de un “Procesamiento Digital de Señales”, en su caso es un filtrado digital realizado con FIR (Respuesta de Impulso Finito), donde también se eliminan las frecuencias no fundamentales como es mostrado en la figura 2.5, y proporciona información del fasor la cual es deseable para la implementación digital del comparador de ángulo de fase del relevador de distancia [22].

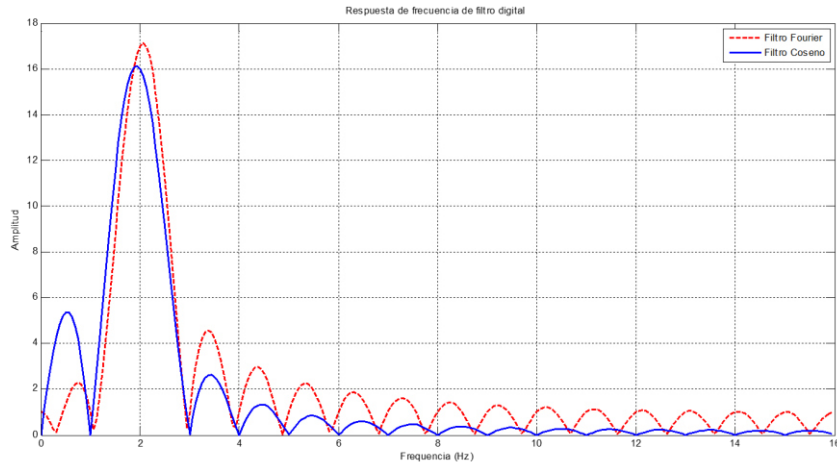


Figura 2.4. Respuesta de frecuencia de filtros digitales.

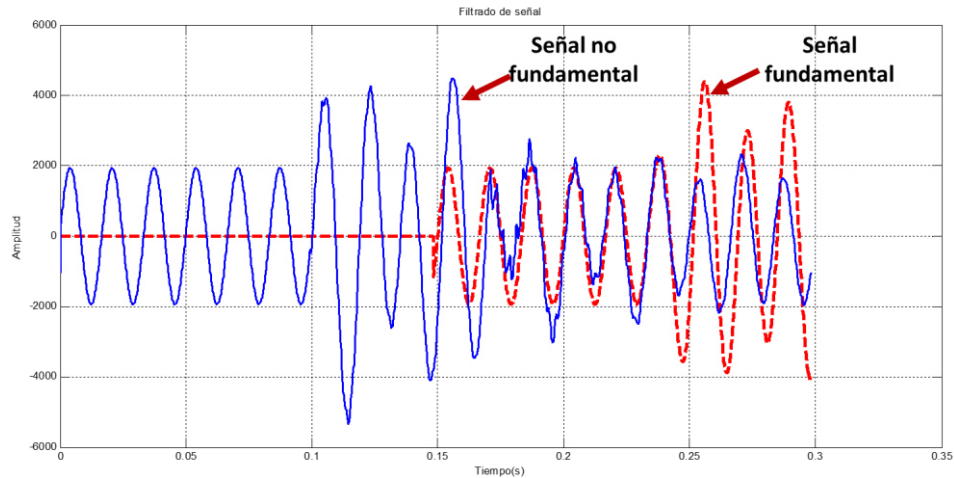


Figura 2.5. Señal fundamental de corriente.

Los datos estimados de la componente de frecuencia fundamental de los fasores de voltaje y corriente usan el filtro de Fourier o Coseno para determinar la parte real e imaginaria de la corriente y voltaje usado en el relevador. Cada muestra de corriente y voltaje es multiplicada por un factor seno para obtener la componente real y por un factor coseno para obtener la componente imaginaria.

Este filtrado tiene la capacidad de trabajar en diferentes tamaños de “ventana”. La ventana de ciclo completo genera la sumatoria usando todos los datos muestreados a lo largo de todo el ciclo, *en el trabajo se presenta un ciclo de 128*

*muestras* (ver Figura 2.6), sin embargo una ventana de medio ciclo solo genera los que están a medio ciclo del muestreo, que en dicho caso será 64 muestras.

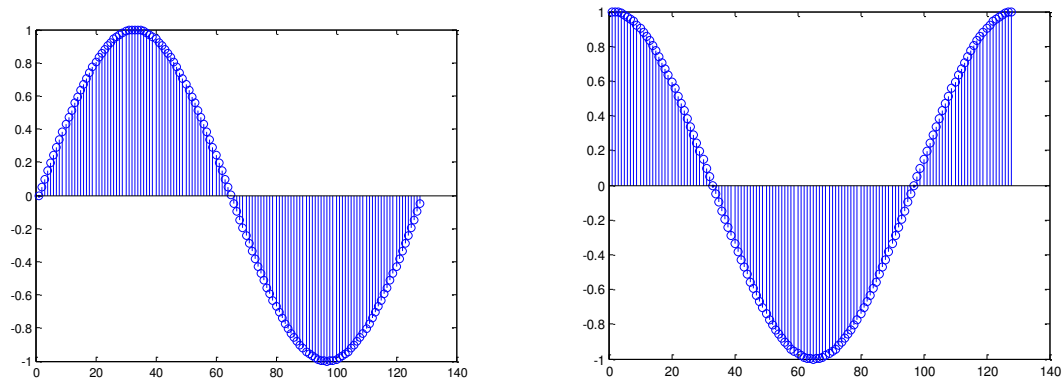


Figura 2.6. Datos muestreados de señales en un ciclo.

Como es mostrado en el esquema de la figura 2.7, la información procesada en el filtro determina los fasores de las señales de voltaje y corriente, las cuales son monitoreadas por medio de los comparadores de señales, para determinar y tomar la decisión si el sistema se encuentra en condición normal de operación o si se encuentra presente una falla en el elemento protegido, en el último de los casos el relevador enviara una señal de disparo al interruptor para que la falla sea liberada y aislar esta zona de falla del resto del sistema.

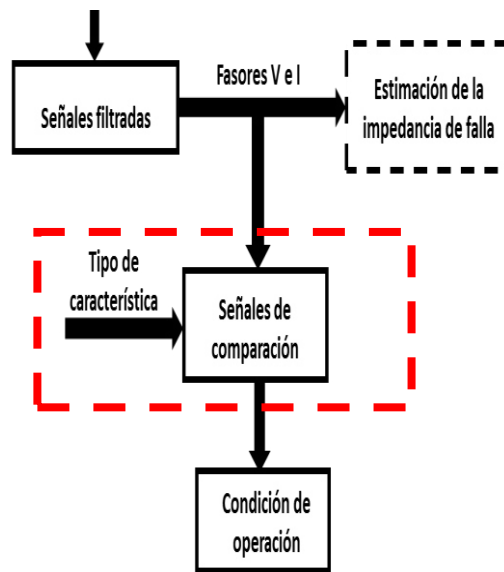


Figura 2.7. Determinación de fasores.

## 2.5 COMPARADORES DE RELEVADOR DE DISTANCIA.

Los relevadores de distancia cuentan con señales de comparación para su propia operación, sin embargo, como fue mencionado anteriormente esta comparación es obtenida a partir de las señales de entrada eléctricas de los transformadores de medición; así obteniendo las señales para los dos tipos de comparadores que pueden ser de amplitud o fase.

Un comparador de amplitud es un dispositivo cuya operación es gobernada por la amplitud relativa de las señales de entrada  $S_O$  y  $S_R$ , estas señales son rectificadas y entonces aplicadas a un circuito detector polarizado. Si, la señal de operación  $S_O$  es mayor que la señal de restricción  $|S_O| \geq |S_R|$  el relevador actuara, el límite de operación es determinado por  $|S_O| = |S_R|$  [3].

Sin embargo, un comparador de fase es designado por dos señales de entrada, señal de operación  $S_1$  y señal de polarización  $S_2$ , teniendo como ángulo de desplazamiento  $\beta$  entre sus señales de entrada para realizar la comparación entre ambas. Los ángulos de limitación  $\beta_1$  y  $\beta_2$  del comparador de fase son conocidos como ángulos de coincidencia, y son utilizados para la operación del relevador cuando se cumpla lo siguiente  $-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ .

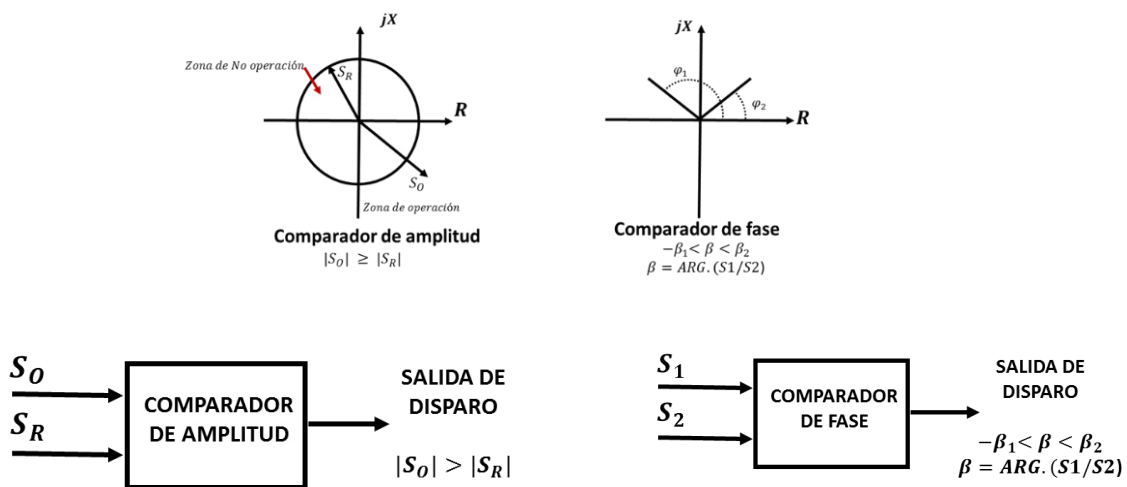


Figura 2.8. Comparadores de señal.

El comparador de distancia cuenta características tanto circulares y/o líneas rectas, tales características son representadas en un diagrama R-X, donde las señales de entrada del comparador mencionadas en párrafos anteriores adoptan la siguiente forma:

$$S_O \text{ ó } S_1 = k_1 \angle \alpha_1 \cdot V_r \angle 0^\circ + Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r - \angle \phi_r \quad (2.1)$$

$$S_2 \text{ ó } S_R = k_2 \angle \alpha_2 \cdot V_r \angle 0^\circ + Z_{R2} \angle \theta_2 \cdot I_r - \angle \phi_r \quad (2.2)$$

donde  $K_1$  y  $K_2$  son valores constantes,  $Z_{R1}$  y  $Z_{R2}$  son impedancias de la línea,  $I_R$  y  $V_R$  son las señales eléctricas de las entradas provenientes de los transformadores de instrumentos.

## 2.6 CARACTERÍSTICAS DEL RELEVADOR DE DISTANCIA.

El relevador de distancia cuenta con diferentes características que dependen de las zonas de operación a la cual será evaluada, son representadas en un plano complejo R-X donde la resistencia R es la abscisa y la reactancia X es la ordenada; el origen es la ubicación del relevador con el área de operación generalmente en el primer cuadrante [4]. Se presenta a continuación las características de operación del relevador de distancia con sus diferentes valores de diseños.

- Característica tipo impedancia.

Este tipo de característica presenta una forma circular que se centra en el origen del plano complejo R-X, donde el relevador funcionara si la impedancia medida se encuentra en cualquiera de los cuatro cuadrantes, siendo esta comparada con una magnitud especificada (ver Figura 2.9). En una comparación de amplitud el relevador dispara cuando tenemos lo siguiente,

$$|-V_r \angle 0^\circ + Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r| \geq |V_r \angle 0^\circ| \quad (2.3)$$

es decir,  $|Z_r \angle \phi_r - Z_R \angle \theta_1| \geq |Z_r \angle \phi_r|$ ;

Sin embargo, se tiene para una comparación de fase,

$$S_1 = -V_r \angle 0^\circ + Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r \quad S_2 = V_r \angle 0^\circ + Z_{R2} \angle \theta_2 \cdot I_r \angle -\phi_r \quad (2.4)$$

El relevador con comparación de fase entra en operación al presentarse lo siguiente  $-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ , teniendo como ángulo entre las señales a  $\beta$ .

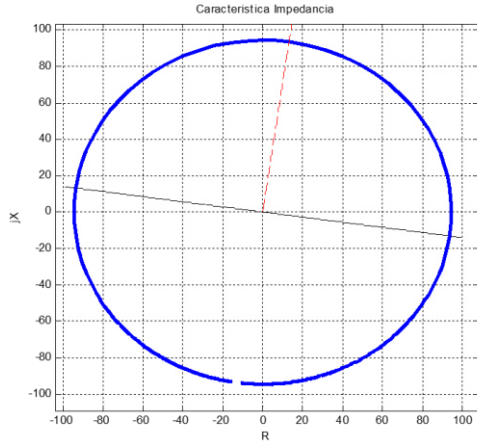


Figura 2.9. Tipo impedancia.

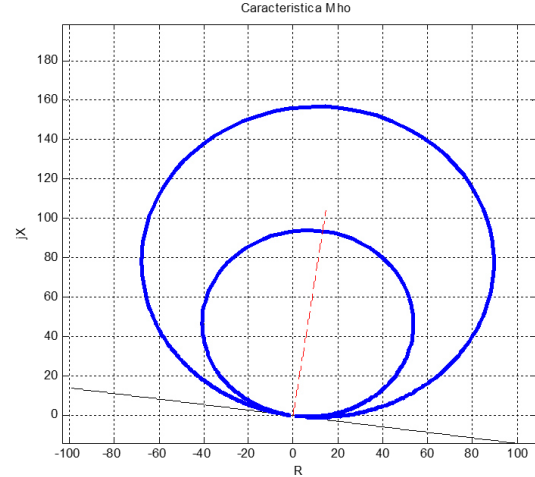


Figura 2.10. Tipo Mho.

- Característica tipo Mho.

Los relevadores tipo Mho tienen una forma circular que pasa a través del origen del plano, donde el centro se encuentra ubicado sobre la línea de la impedancia característica (ver Figura 2.10). Las señales de entrada del comparador de fase son:

$$S_1 = -V_r \angle 0^\circ + Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r \quad S_2 = V_r \angle 0^\circ \quad (2.5)$$

La señal de operación y señal de restricción para una comparación de amplitud son las siguientes,

$$S_O = |Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r| \quad S_R = |2V_r \angle 0^\circ - Z_{R2} \angle \theta_2 \cdot I_r \angle -\phi_r| \quad (2.6)$$

Por lo tanto el relevador entra en operación,

$$|2V_r \angle 0^\circ - Z_{R2} \angle \theta_2 \cdot I_r \angle -\phi_r| \leq |Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r|, \text{ es decir } |S_O| \geq |S_R| \quad (2.7)$$

- Característica tipo impedancia ángulo.

Esta característica cuenta con un punto límite, donde una línea recta que no cruza por el origen de coordenadas es presentada en el plano complejo. Se tiene que para un comparador de fase,

$$S_1 = -V_r \angle 0^\circ + Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r \quad S_2 = Z_{R2} \theta_2 \cdot I_r \angle -\phi_r \quad (2.8)$$

La operación es obtenida teniendo  $-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$  (ver Figura 2.11). Por tanto, para una comparación de amplitud se tiene que

$$|2Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r - V_r \angle 0^\circ| \leq |V_r \angle 0^\circ| \quad (2.9)$$

- Característica tipo Mho desplazada.

Es parecida a la característica tipo Mho, sin embargo, presenta direccional ya que se desplaza en forma positiva y negativa, de esta manera detecta fallas a corta distancia detrás del relevador (ver Figura 2.12). Para la comparación de fase se tienen las señales de entrada:

$$S_1 = Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r - Z_d \angle \theta_d \cdot I_r \angle -\phi_r, S_2 = V_r \angle 0^\circ - Z_d \angle \theta_d \cdot I_r \angle -\phi_r \quad (2.10)$$

Sin embargo, la comparación de amplitud el relevador dispar cuando,

$$|Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r - Z_d \angle \theta_d \cdot I_r \angle -\phi_r| \geq |2V_r \angle 0^\circ - Z_{R2} \angle \theta_2 \cdot I_r \angle -\phi_r - Z_d \angle \theta_d \cdot I_r \angle -\phi_r| \quad (2.11)$$

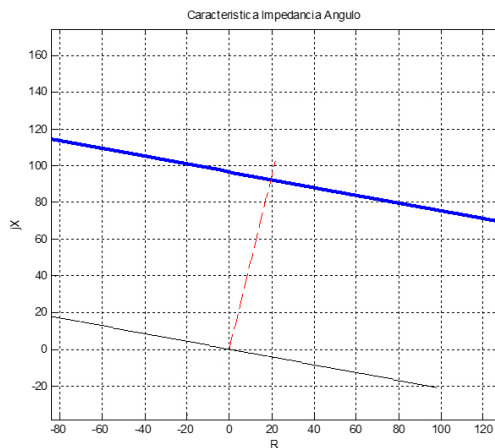


Figura 2.11. Tipo impedancia ángulo.

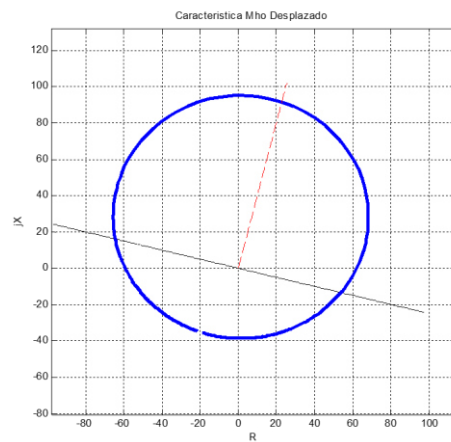


Figura 2.12. Tipo Mho desplazada.

- Característica cuadrilateral.

Este tipo de característica es formada por un polígono, donde sus lados se encuentran en límite por los alcances resistivos y reactivos del relevador en el plano complejo; básicamente implica la combinación de cuatro unidades de medición. Estas unidades constan de una unidad de reactancia (línea superior), dos unidades resistivas (lados izquierdo y derecho) que evitan la operación incorrecta por aumento de carga u oscilaciones de potencia y un elemento direccional (línea inferior) [4]. Permite ajustar el alcance hacia adelante y el alcance resistivo en forma independiente, sin embargo requiere de dos mediciones porque el área de operación está compuesta de un ángulo de distancia y ángulo direccional.

Esta característica es especialmente útil para fallas a tierra que a menudo están restringidas y, por lo tanto, la capacidad de detectar una resistencia significativa asociada con la restricción es importante [4]. La operación en una comparación de fase se da cuando  $-90^\circ \leq (\beta - \theta) \leq 90^\circ$ , donde  $\beta$  es el ángulo entre  $V$  e  $I$  y  $\theta$  es el ángulo de la impedancia de arranque.

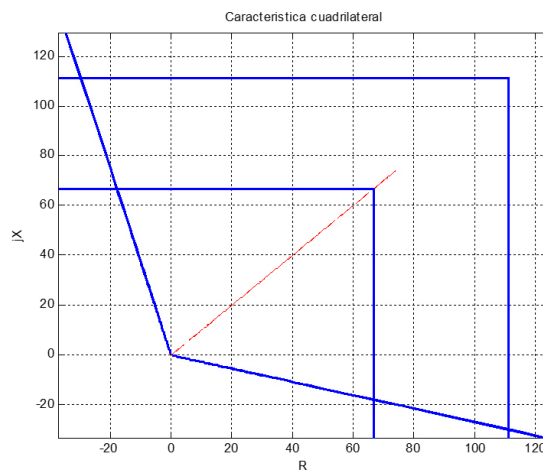


Figura 2.13. Tipo cuadrilateral.

*El esquema de operación del relevador de distancia es descrito a continuación:*

1. Las señales de entradas medidas de los transformadores de instrumentos son usada para estimar la componente fundamental del fasor.
2. Se define la característica de operación del relevador de distancia.



3. Se forman las señales de comparación y la condición de disparo es evaluada.

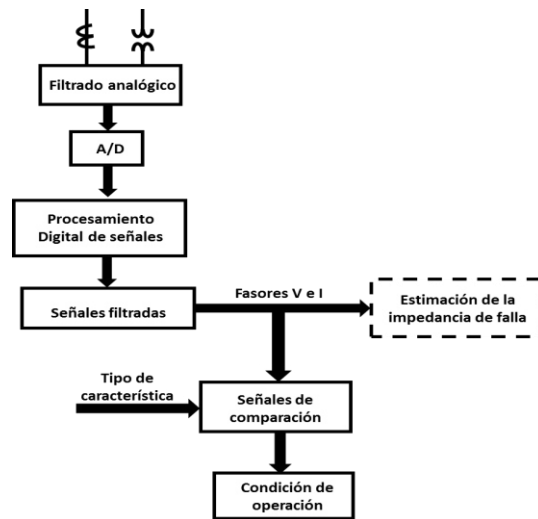


Figura 2.14. Diagrama de estimación fasorial.

## 2.7 CONCLUSIONES

Al ser llevado a cabo el diseño y modelado del relevador de distancia es de entendimiento el valioso análisis que se debe llevar a cabo para la selectividad y operación de los relevadores, debido a que las perturbaciones y componentes frecuenciales pueden llegar a afectar las señales de voltaje y corriente de entrada a los comparadores, y por consiguiente tener una mala operación del relevador.

El desarrollo de las características de operación se realiza mediante el uso de los comparadores, para poder simular el comportamiento de cada característica y determinar la zona de operación dependiendo de los parámetros de ajuste y del sistema a simular.

Esta metodología de diseño de las características del relevador nos permite generar funciones adaptables, dependiendo de las condiciones de operación y parámetros en el sistema de potencia, obteniendo de esta manera características que pueden llegar a ser adaptables para una mejor discriminación en la zona de operación.

## CAPÍTULO 3

### COMPENSACIÓN SERIE Y ACOPLAMIENTO MUTUO

#### 3.1 COMPENSACIÓN SERIE

El capacitor es instalado en serie con las líneas de transmisión, consiste de un sistema integrado mediante el diseño personalizado del capacitor y de su sistema de protección en base a sobrevoltajes.

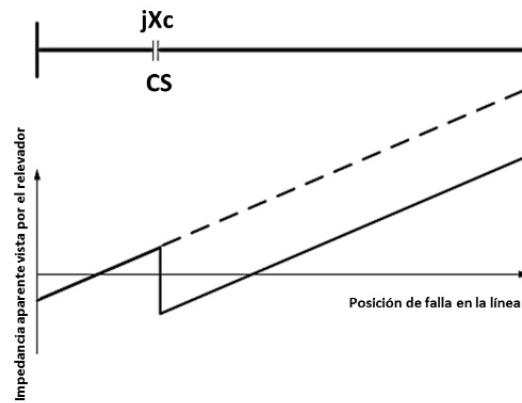


Figura 3.1. Impedancia vista por el relevador con y sin compensación.

Los capacitores en serie y sus dispositivos de protección de sobrevoltaje al ser instalados en las líneas de transmisión desplazan los efectos de la inductancia serie de la línea, teniendo como resultado una mejor capacidad y estabilidad de transmisión de potencia de la línea. La reactancia de los capacitores ( $X_C = 1/\omega C$ ) compensa una porción de la reactancia longitudinal de la línea ( $X_L = 1 \cdot \omega L$ ) y como consecuencia se tiene un incremento en la potencia transmisible [2]. Se tiene la capacidad de la transferencia de potencia de la línea es dado por,

$$P = \frac{E \cdot V}{X} \sin \delta \quad (3.1)$$

donde,  $E$  está enviando el voltaje final,  $V$  está recibiendo el voltaje,  $X$  es la reactancia de la línea,  $\delta$  es el ángulo de fase entre  $E$  y  $V$ .

A continuación se expresa la transferencia de potencia sin y con compensación:

$$P_1 = \frac{E \cdot V}{X_L} \sin \delta \quad (3.2)$$

$$P_2 = \frac{E \cdot V}{X_L - X_C} \sin \delta \quad (3.3)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{X_L}{(X_L - X_C)} = \frac{1}{(1 - X_C/X_L)} = \frac{1}{1 - K} \quad (3.4)$$

donde  $K$  es el grado de compensación, en un rango de 40-70%. Se demuestra que mediante la introducción de una reactancia capacitiva en el denominador de la ecuación, se consigue una disminución de la separación angular con transmisión de potencia no afectada, es decir, un aumento de la estabilidad angular del enlace.

Sin embargo, los capacitores series pueden llegar a crear varios problemas para los relevadores de protección de distancia en las líneas, debido a los cambios bruscos en los parámetros de línea en el punto de compensación serie; incluyendo fenómenos como la inversión de voltaje y/o corriente, sub armónicos, oscilaciones, y transitorios [8]. Esto dará lugar a cambios en la impedancia aparente medida por el relevador, decidiendo si la falla está dentro o fuera de la zona de operación. Por ello, cuando se sabe que el capacitor será parte del circuito de falla, es de suma importancia corregir el ajuste del relevador. En la figura se muestra un arreglo típico de una línea de transmisión con compensación serie.

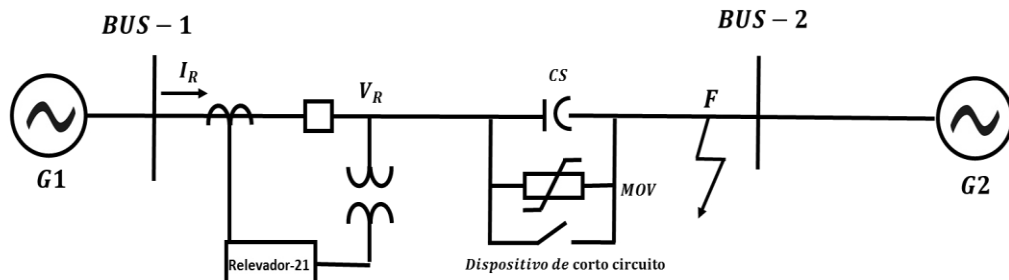


Figura 3.2. Configuración de Compensación serie.

### 3.2 CONFIGURACIÓN DEL CAPACITOR

El capacitor es diseñado para un cierto voltaje, el cual puede ser de 2 a 3 veces el voltaje o corriente estimada por una pequeña duración. El voltaje estimado del capacitor es el voltaje que pasa a través del capacitor cuando la corriente de carga máxima pasa por medio. En varios casos, se presenta la corriente de falla es tres veces más grande que la corriente de carga. A continuación se muestra en la Figura 3.3 el arreglo del capacitor serie con el dispositivo de protección de sobrevoltaje.

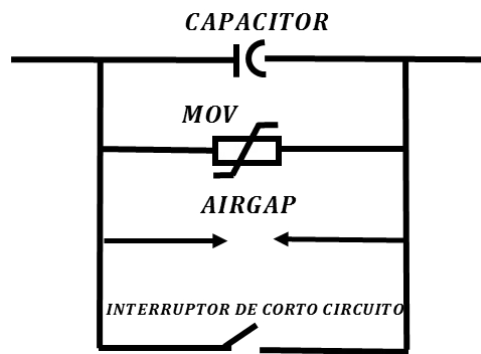


Figura 3.3. Compensador serie.

Estos dispositivos de protección de sobrevoltaje son los *MOV's*, el *Airgap* y el interruptor de corto circuito que son conectados en paralelo con el capacitor, donde el *MOV* es un resistor no lineal y funciona para reducir o eliminar los sobrevoltajes que se presentan a través de los capacitores cuando se presenta una falla (ver Figura 3.4), manteniendo el voltaje del capacitor igual o inferior al valor pico. El *MOV* tiene suficiente capacidad para absorber energía en el peor de los casos y por tanto conducir corriente de falla durante fallas externas e internas.

En [18] Goldsworthy se mostró que el arreglo en paralelo del capacitor y el *MOV* son equivalentes a la combinación serie de un resistor ( $R_{MOV-SC}$ ) y una reactancia capacitiva ( $X_{MOV-SC}$ ) teniendo por tanto una impedancia equivalente como una función de corriente de línea normalizada basada en el nivel de protección del capacitor (ver figura 3.4).

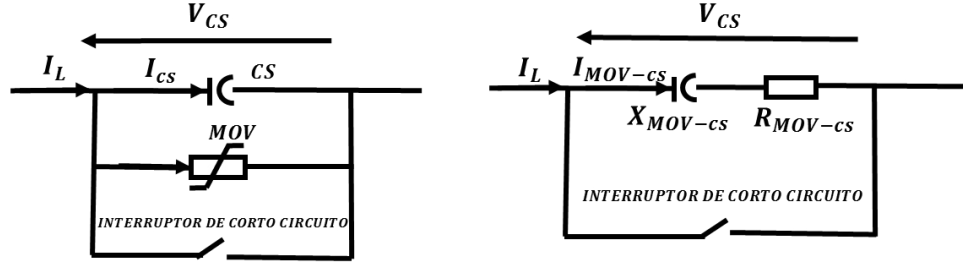


Figura 3.4. Arreglo de capacitor en serie.

Los parámetros bajo corrientes de corto circuito del modelo equivalente del capacitor serie con la protección del *MOV* pueden ser determinados por las ecuaciones (3.5) y (3.6).

$$R_{MOV-SC} = X_{SC}(0.0745 + 0.49e^{-0.243 I_{pu}} - 35.0e^{-5.0 I_{pu}} - 0.6e^{-1.4 I_{pu}}) \quad (3.5)$$

$$X_{MOV-SC} = X_{SC}(0.1010 - 0.005749 I_{pu} + 2.088e^{-0.8566 I_{pu}}) \quad (3.6)$$

$$I_{pu} > 0.98 \quad (3.7)$$

donde  $I_{pu}$  es la corriente de falla expresada en por unidad del nivel de corriente de protección en el capacitor. Este sólo aplica con la condición de que la corriente del capacitor exceda 98% del nivel de corriente de protección.

De otra manera,  $R_{MOV-SC} = 0$  y  $X_{MOV-SC} = X_C$ . Por lo tanto, cuando la protección de sobrecarga opera, el capacitor es corto circuitado y  $R_{MOV-SC} = X_{MOV-SC} = 0$ .

Este modelo es útil para comprensión de algunos fenómenos, sin embargo, sus aplicaciones prácticas son muy difíciles. Debido a que la resistencia y la reactancia equivalente son funciones no lineales haciendo imposible todos los cálculos analíticos.

### 3.3 OPERACIÓN DEL CAPACITOR SERIE.

Normalmente, durante condiciones de falla, el *MOV* (Varistor Oxido Metálico) comienza a conducir inmediatamente después de que el voltaje instantáneo ( $v$ ) a través del capacitor excede un nivel de voltaje de protección ( $V_{prot}$ ). La característica altamente no lineal del *MOV* lo hace ideal para mantener el voltaje a través del capacitor dentro de un límite especificado. El modelo del *MOV* es dado por la ecuación (3.8),

$$i_{MOV} = I_{max} \left( \frac{v}{V_{prot}} \right)^{\alpha} \quad (3.8)$$

donde,

$i_{MOV}$  = Corriente del *MOV*.

$I_{max}$  = Corriente maxima que enciende el *airgap*.

$\alpha$  = Valor constante, entre 30 – 50.

$V_{prot}$  = Nivel de proteccion de voltaje.

Se muestran a continuación las condiciones de operación del capacitor con la protección de sobrevoltaje:

- Para fallas de baja corriente el capacitor permanece en servicio, la caída de voltaje a través del capacitor está por debajo del nivel de protección de voltaje.
- Bajo condiciones de fallas de alta corriente, el capacitor es cortocircuitado de servicio y entra en funcionamiento el *MOV* para proteger al capacitor cuando es presentado un sobrevoltaje en la línea, debido a que la caída de voltaje excede el nivel de ajuste del dispositivo de protección, teniendo como resistencia igual a cero y una reactancia pura. Durante esta condición, la corriente de falla pasará a través del *MOV* en lugar del capacitor; por lo tanto, el capacitor no será dañado por alto voltaje y seguirá funcionando como parte del sistema.

Estas dos condiciones incrementan difícilmente el ajuste del relevador. Un ajuste del relevador sin la consideración del *MOV* podría sobrealcanzarse y fácilmente perder su direccionalidad.

La resistencia del *MOV* varía como el voltaje en la terminal del capacitor varía, por lo tanto el *MOV* opera con respecto al tipo de falla y el nivel de corriente de falla. Sin embargo, la energía absorbida por el *MOV* será monitoreada y si llegara a exceder un cierto límite térmico, el *airgap* enciende para proteger al *MOV* cuando sea excedida la energía capacitiva.

A continuación, se muestra en la figura 3.5 el modelo de compensación serie usado en las simulaciones en *Matlab/Simulink*®. El bloque del sistema trifásico consta de tres subsistemas con mismo valor de parámetros, uno para cada fase de una línea de transmisión trifásica. El *Airgap* es también conectado en paralelo con el bloque del *MOV*, este se enciende cuando la energía absorbida por el *MOV* excede el límite. La energía disipada en el *MOV* es calculada por el integrador de potencia (producto del voltaje y corriente del *MOV*). Un circuito de amortiguamiento R-L es conectado en serie con el *airgap* para limitar la velocidad de aumento de la corriente del capacitor al ser disparado el *airgap*.

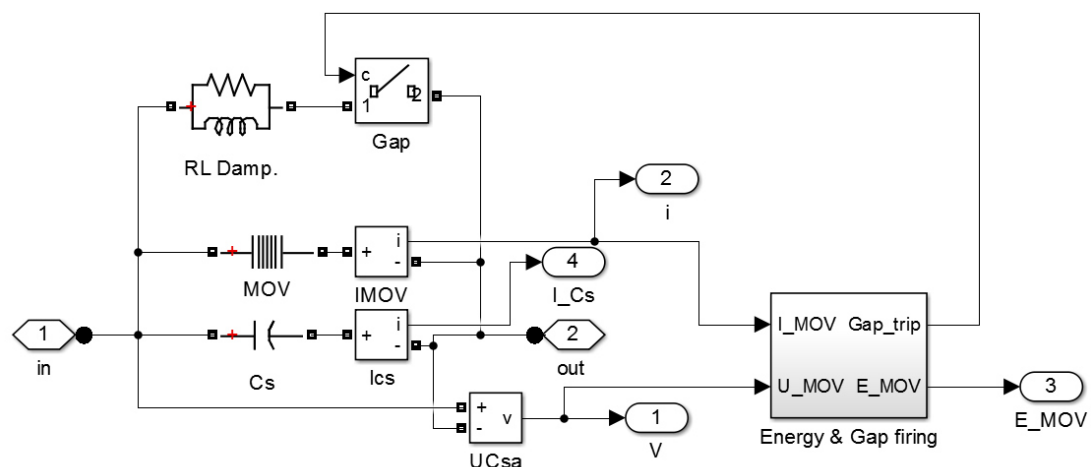


Figura 3.5. Modelo de compensación serie monofásico.

En la figura 3.6 son mostradas las señales de corriente y voltaje del capacitor cuando se encuentra en servicio, se observa que la señal de voltaje no se encuentra por encima del nivel de protección de voltaje que se obtuvo en los cálculos posteriores abajo.

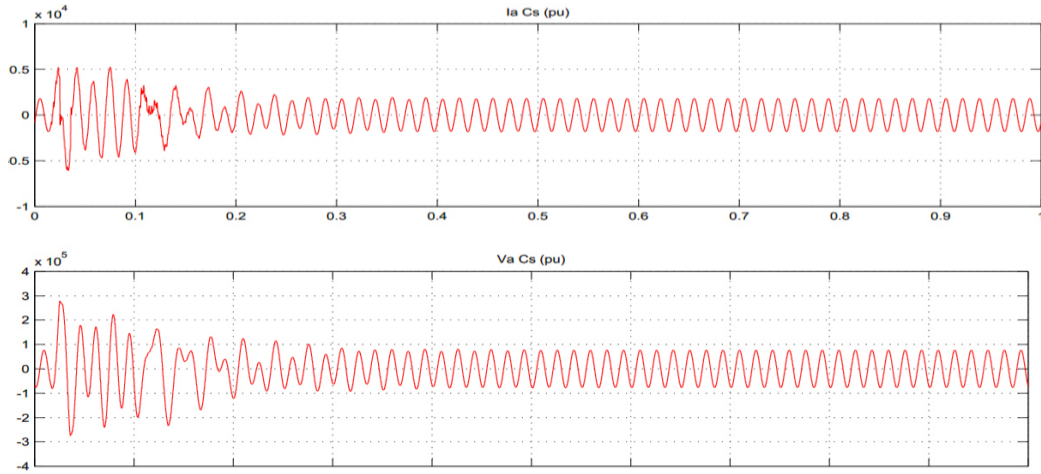


Figura 3.6. Señales de corriente y voltaje del capacitor serie en servicio.

Se presenta a continuación el cálculo del nivel de voltaje de protección:

Obtención total de la reactancia de la línea en secuencia positiva:

$$X_{l1} = 9.2974e - 4 * (2 * \pi * 60) * 300 = 105.6 \text{ ohms} \quad (3.9)$$

Capacitancia requerida para el 40% de compensación:

$$\begin{aligned} X_c &= 0.4 * 105.6 = 42.24 \text{ ohms} \\ \text{or } C_s &= 62.8 \mu F \end{aligned} \quad (3.10)$$

donde  $X_c$  es la reactancia del capacitor. La corriente de nivel de protección  $I_{prot}$ , determina el nivel de protección de voltaje del *MOV*, el cual es comúnmente diseñado para ser múltiple (2 - 2.5) del nivel de rango de voltaje del capacitor. El pico del voltaje del capacitor es calculado,

$$V_{prot} = 2.5 \sqrt{2} I_{prot} X_c \quad (3.11)$$

$$V_{prot.} = 2.5 * 2kA * 42.24 * \text{sqrt}(2) = 298.7 \text{ kV} \quad (3.12)$$



### 3.4 EFECTOS DEL CAPACITOR EN EL RELEVADOR.

El capacitor en serie al ser instalado en las líneas de transmisión cancela parte de la reactancia inductiva de la línea; por lo tanto, cuando los ajustes del relevador de distancia no toman en cuenta al capacitor en el circuito de fallas, surgen varios problemas que puede hacer que fallas adelante aparezcan en una zona del revelador donde no debería. Esto causa que el relevador se “sobrealcance” de la zona de operación (ver figura 3.7), dependiendo si el capacitor serie se encuentra en servicio, en corto circuito por la protección de sobrevoltaje o parcialmente en servicio y parcialmente en corto circuito.

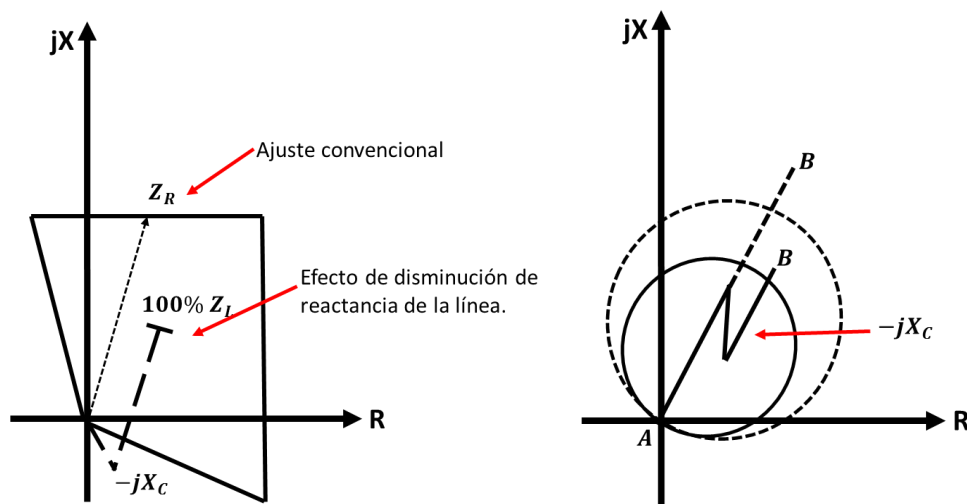


Figura 3.7. Efecto de Sobrealcance.

Sin embargo, para los efectos también se debe tomar en cuenta la localización del capacitor y el grado de compensación, donde prácticamente los capacitores serie son localizados en medio de la línea, o en las terminales de la línea. Es evidente que para un alto grado de compensación y una falla cerca del capacitor, la reactancia vista por el relevador podría ser capacitiva. Bajo estas situaciones, fallas cercas pueden ser fallas inversas presentadas como inversión de voltaje y/o corriente. Estos problemas son perjudicados por la acción de los dispositivos de protección (*MOV*) del capacitor serie donde se altera dinámicamente el grado de compensación durante la falla [18]. En esta sección se va describir como estos efectos pueden llegar a crear una mala operación en el relevador de distancia.

### 3.4.1 Sobrealcance

Dos diferentes configuraciones de la línea son usadas en práctica de acuerdo a la posición del dispositivo de compensación en el circuito; compensación al final de la línea y compensación en medio de la línea.

Entonces, al tener los capacitores en serie junto con el *MOV* instalado entre la falla y la ubicación del relevador, estos afectarán la impedancia aparente vista por el relevador; presentando un sobrealcance en la operación del relevador. El circuito de lazo de falla estará formado por la impedancia de línea a donde fue presenciada la falla, la resistencia de falla y la impedancia equivalente del capacitor serie y el *MOV*; esto permite observar el fenómeno de sobrealcance de distancia donde la impedancia aparente es desplazada hacia abajo y a la derecha como se muestra en la Figura 3.8.

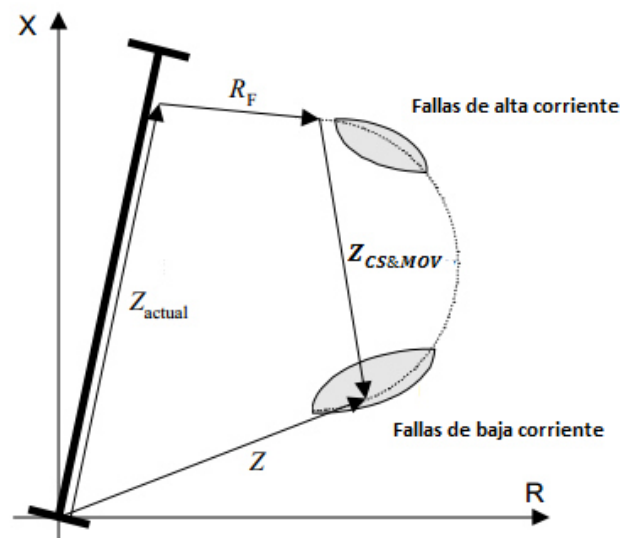


Figura 3.8. Sobrealcance en el relevador debido a la compensación serie [21].

Para fallas de baja corriente, la impedancia equivalente de la combinación paralela del *CS/MOV* es una reactancia puramente capacitiva desplazando, como fue mencionado anteriormente, a la impedancia aparente hacia abajo por la reactancia capacitiva completa del capacitor. El sobrealcance puede ser tan alto como el rango de compensación de 25-75 %. Mientras tanto, para fallas de alta corriente la impedancia equivalente de la combinación paralela del *CS/MOV*

desplaza la impedancia aparente solo ligeramente a la derecha. Por lo tanto, el sobrealcance del relevador es mínimo para esta condición. Esta observación conduce a un concepto de un alcance adaptable controlado por la corriente descrito en [21].

Otra observación que se puede observar de la figura 3.8 es una falla en función de la distancia para responder a una falla cerca de baja corriente. Bajo esta falla, la impedancia aparente se mueve al cuarto cuadrante del plano de impedancia dando lugar a problemas con la discriminación direccional [21]. Para simular este efecto en el relevador de distancia, se utilizó un sistema de prueba presentado en [8] y es mostrado en la figura 3.9.

➤ Sistema 1.

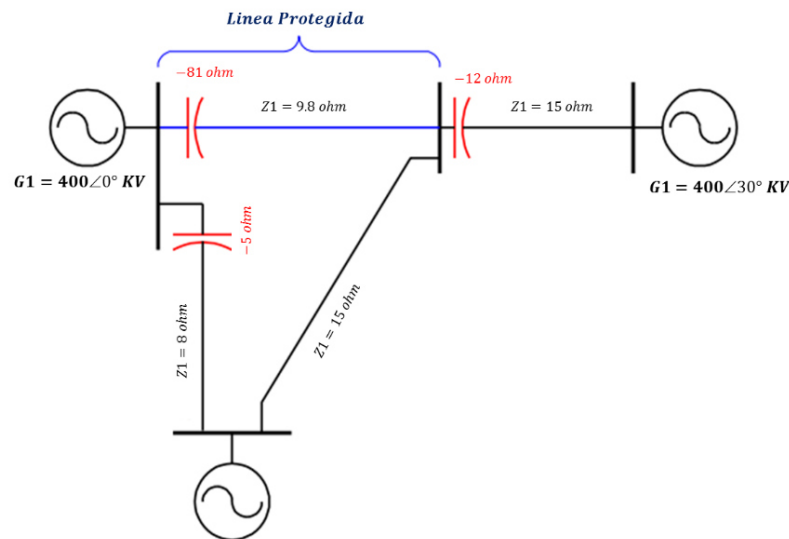


Figura 3.9. Sistema de prueba con línea compensada en serie.

No obstante, el sistema completo puede ser mostrado en un sistema equivalente como se muestra en la figura 3.10, donde el relevador de distancia presenta este efecto solo cuando se tiene el capacitor junto con los elementos de protección (*MOV* y *airgap*) en la terminal izquierda de la línea simulada.

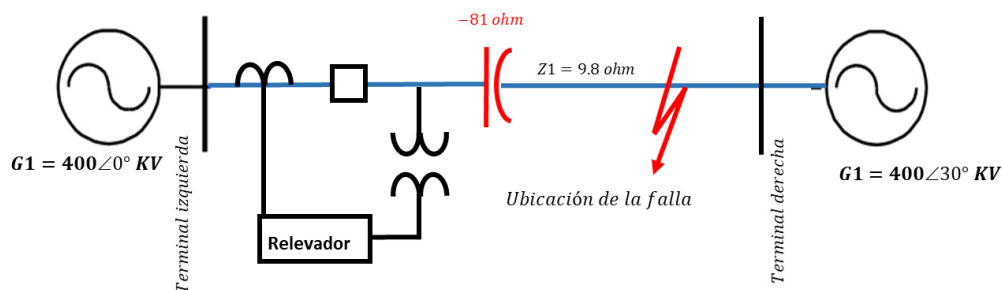


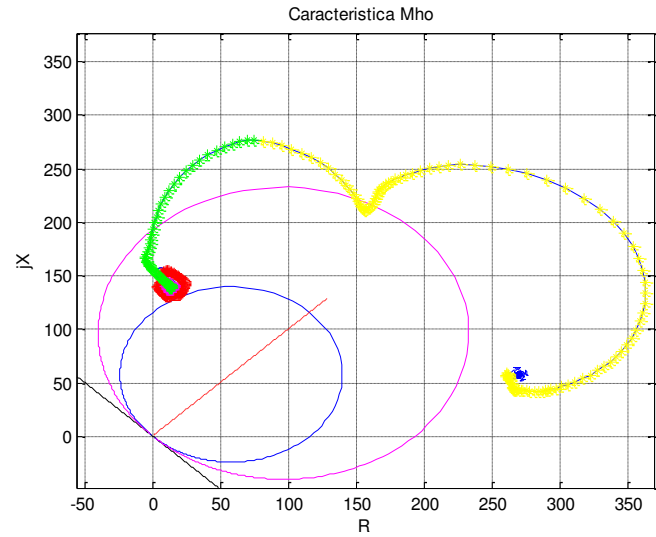
Figura 3.10. Sistema de prueba equivalente.

Se muestran a continuación los parámetros del sistema:

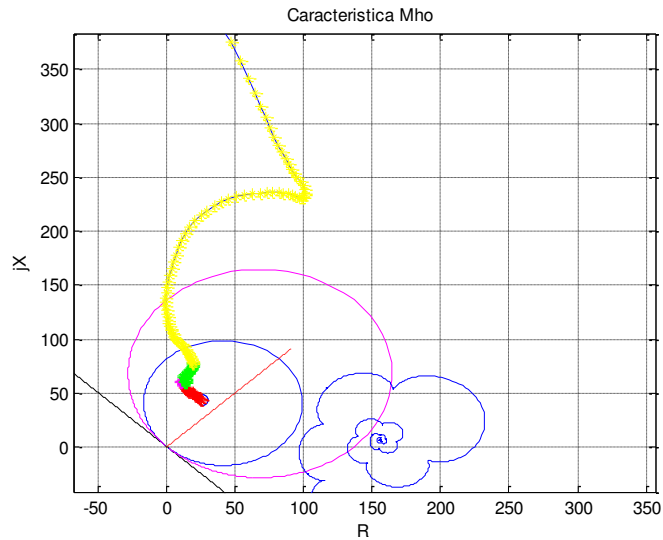
Tabla 3.1. Parámetros de la línea transmisión.

Parámetros	Valores.
Voltaje del Sistema, $kV$	400
Longitud de la línea, $Km$	400
Resistencia de secuencia positiva $R_1$ , $Ohm/Km$	0.0245
Resistencia de secuencia cero $R_0$ , $Ohm/Km$	0.3276
Inductancia de secuencia positiva $L_1$ , $H/Km$	8.5334e-4
Inductancia de secuencia cero $L_0$ , $H/Km$	1.6e-3
Capacitancia en serie de secuencia positiva $C_s$ , $Ohm$	81
Protección de voltaje (@ 10 kA), $kV$	398
Límite de energía térmica, $MJ$	23

Primero, como caso base, la simulación se ejecutó para una compensación serie al 0%, es decir sin capacitor serie, en la figura 3.11a se observa la trayectoria de la impedancia con compensación al 0%; se resulta ver que la impedancia es realmente detectada en la segunda zona de operación del relevador.



(a)



(b)

Figura 3.11. a. Trayectoria de impedancia sin compensación.  
b. Con compensación al inicio de la línea.

Sin embargo, en la figura 3.11b se observa que es presentado el efecto de **sobrealcance** hacia la zona 1 para este sistema, debido a que se tiene el capacitor serie al 60% de compensación en servicio al inicio de la línea como es mostrado en la figura 3.12, donde el voltaje del capacitor no supera el ajuste de protección contra sobrevoltaje.

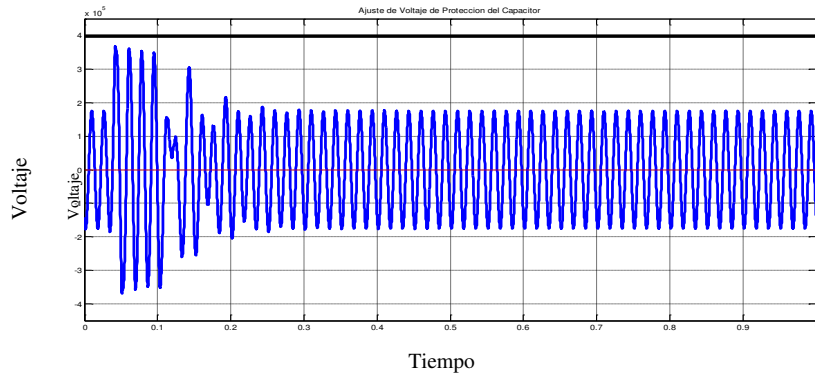
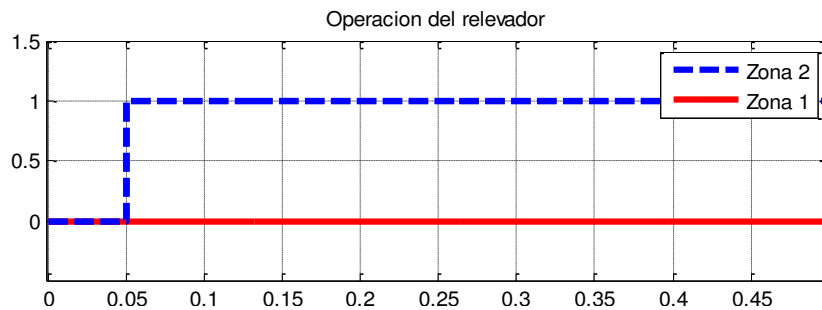
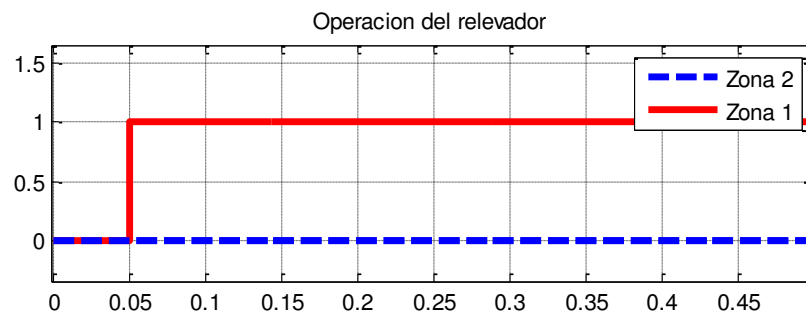


Figura 3.12. Voltaje del capacitor serie en servicio.

En la figura 3.13b se observa que el relevador de fase manda la señal de disparo ya que para el evento con compensación este ve la falla en la primera zona; se observa que su estado de operación cambia de 0 a 1, donde 1 es para operación y 0 en no operación. Sin embargo en la figura 3.13a se observa lo contrario, el relevador opera en la segunda zona al no tener compensación serie en el sistema, que es donde realmente pertenece la detección de la falla, por ello se dice en la figura 3.11b que el relevador tuvo un sobrealcance.



(a)



(b)

Figura 3.13. Operación del relevador a. Sin compensación. b. Con compensación.

Se muestra a continuación, un sistema con diferentes parámetros en la red:

➤ Sistema 2.

El sistema consta de 2 fuentes de 60 Hz unida por una línea de transmisión de 440 kV de potencia con una longitud de 300 km. La compensación serie analizada es hecha en la línea para incrementar la capacidad de transmisión del sistema, el sistema es analizado para un nivel de compensación del 40% de la reactancia de la línea.

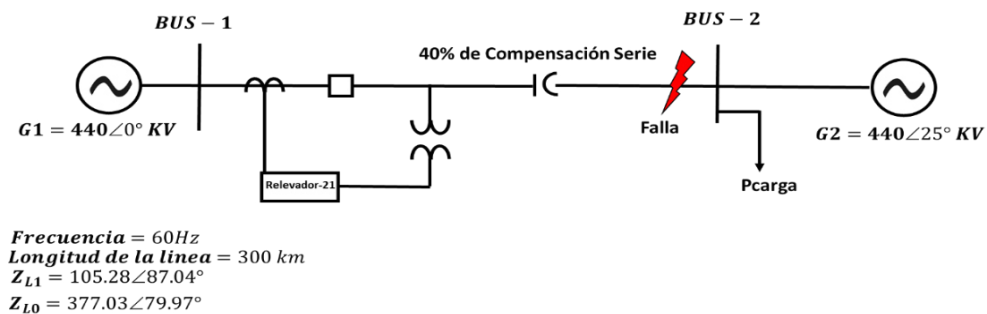


Figura 3.14. Segundo sistema equivalente de prueba.

Se muestran los parámetros del sistema:

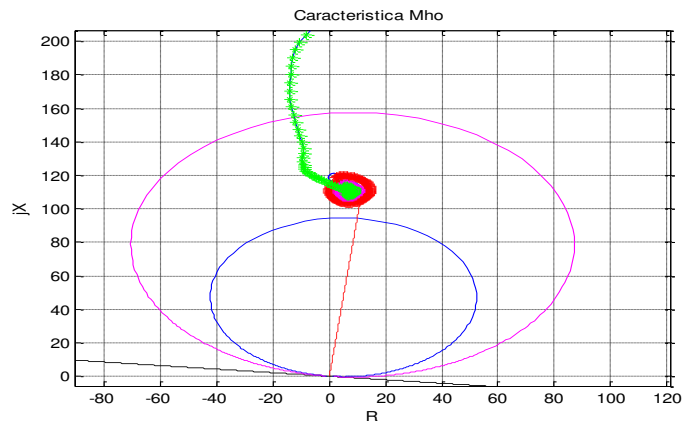
Tabla 3.2. Parámetros de la línea transmisión.

Parámetros	Valores.
Longitud de la línea, Km	300
Resistencia de secuencia positiva $R_1$ , Ohm/Km	0.01809
Resistencia de secuencia cero $R_0$ , Ohm/Km	0.2188
Resistencia mutua de secuencia cero $R_{0m}$ , Ohm/km	0.20052
Inductancia de secuencia positiva $L_1$ , H/Km	9.2974e-4
Inductancia de secuencia cero $L_0$ , H/Km	3.2829e-3
Inductancia mutua de secuencia cero $L_{0m}$ , H/Km	2.0802e-3
Capacitancia de secuencia positiva $C_1$ , F/Km	1.2571e-8
Capacitancia de secuencia cero $C_0$ , F/Km	7.855e-9
Capacitancia mutua de secuencia cero $C_{0m}$ , F/Km	-2.0444e-9

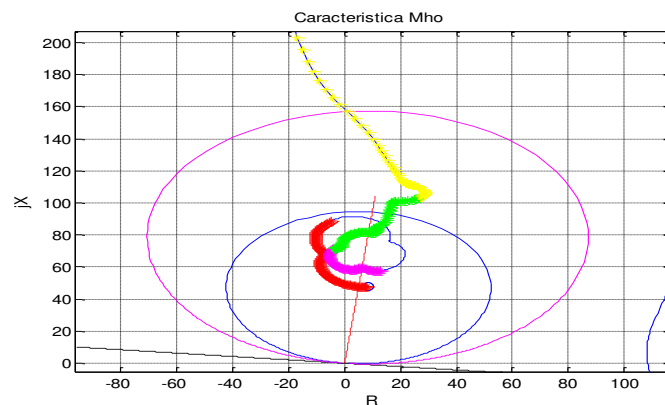
Cuando se tiene un compensador serie en el sistema de potencia como fue mencionado anteriormente es presentado el problema de sobrealcance en la operación del relevador de distancia, debido a la impedancia equivalente del compensador serie que es de tipo resistivo-capacitivo, esta impedancia desfasa la

impedancia aparente medida [45] como se muestra en la Figura 3.15 con un sobrealcance en la medición de la impedancia aparente.

La trayectoria de impedancia que se observa en la figura 3.15 es debido a una falla trifásica en el sistema cuando el dispositivo se encuentra en operación. Se muestran la zona 1 y la zona 2 del relevador utilizando una característica tipo mho; la falla en el sistema sin compensación en esta prueba es presentada en la zona 2 del relevador de distancia, sin embargo en la condición con compensación serie, el relevador opera de forma incorrecta, debido a que se presenta un sobrealcance hacia la zona 1 operando el relevador en la zona 1 y no en la zona 2 donde realmente ocurre la falla.



(a)

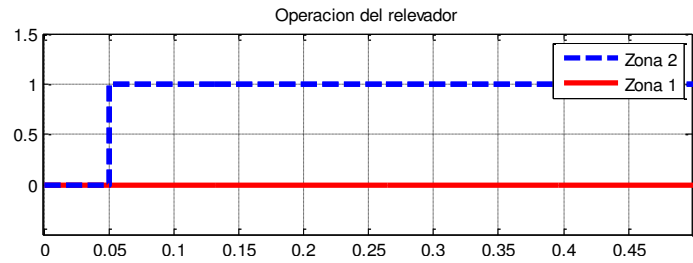


(b)

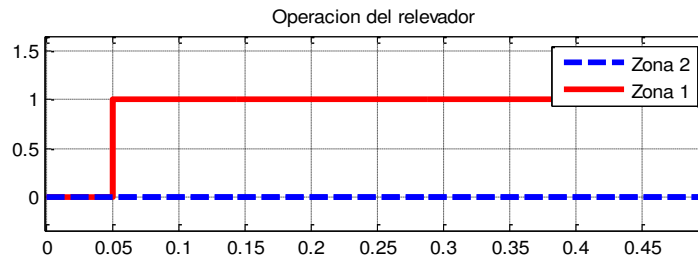
Figura 3.15.a. Trayectoria de impedancia sin compensación.

b. Con compensación al inicio de la línea.





(a)



(b)

Figura 3.16. Operación del relevador a. Sin compensación.

b. Con compensación al inicio de la línea.

En la figura 3.16.a se observa el mismo efecto que en el sistema anterior, el relevador de fase manda la señal de disparo, para el evento sin compensación este detecta la falla en la segunda zona. Sin embargo, en la figura 3.16.b el relevador opera erróneamente en la primera zona al tener compensación serie en el sistema.

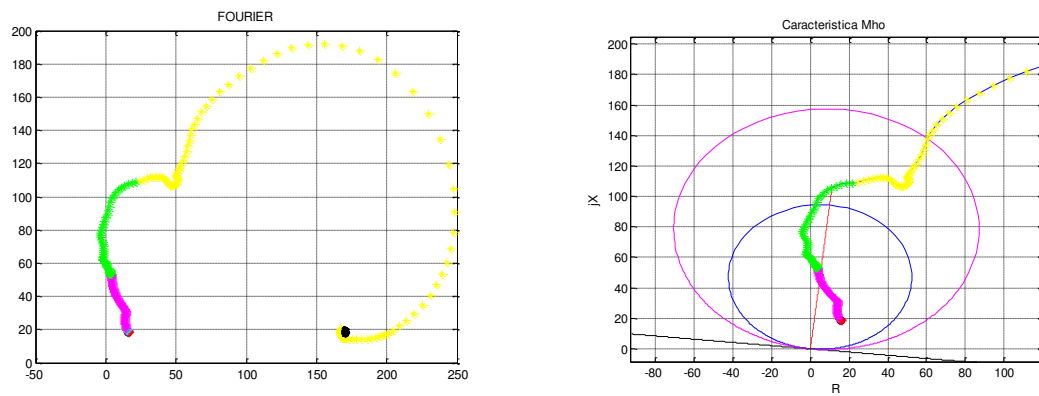


Figura 3.17. Trayectoria de impedancia en el relevador con compensación a mitad de la línea.

En la figura 3.17 de igual manera se presenta el mismo efecto de sobrealcance cuando se tiene el capacitor serie a mitad de la línea, el relevador opera de forma incorrecta, debido a que se presenta un sobrealcance hacia la zona 1.

Sin embargo, en algunos casos con diferentes parámetros este problema al tener la compensación a mitad de la línea es menor.

➤ Caso de estudio con diferentes niveles de compensación.

Las impedancias aparentes para este caso son mostrados en la figura 3.18, donde las trayectorias en color negro (línea), rojo (estrella), azul (circulo) y rosa (cuadrado) son los niveles de compensación del 0%, 30%, 40% y 60%, respectivamente.

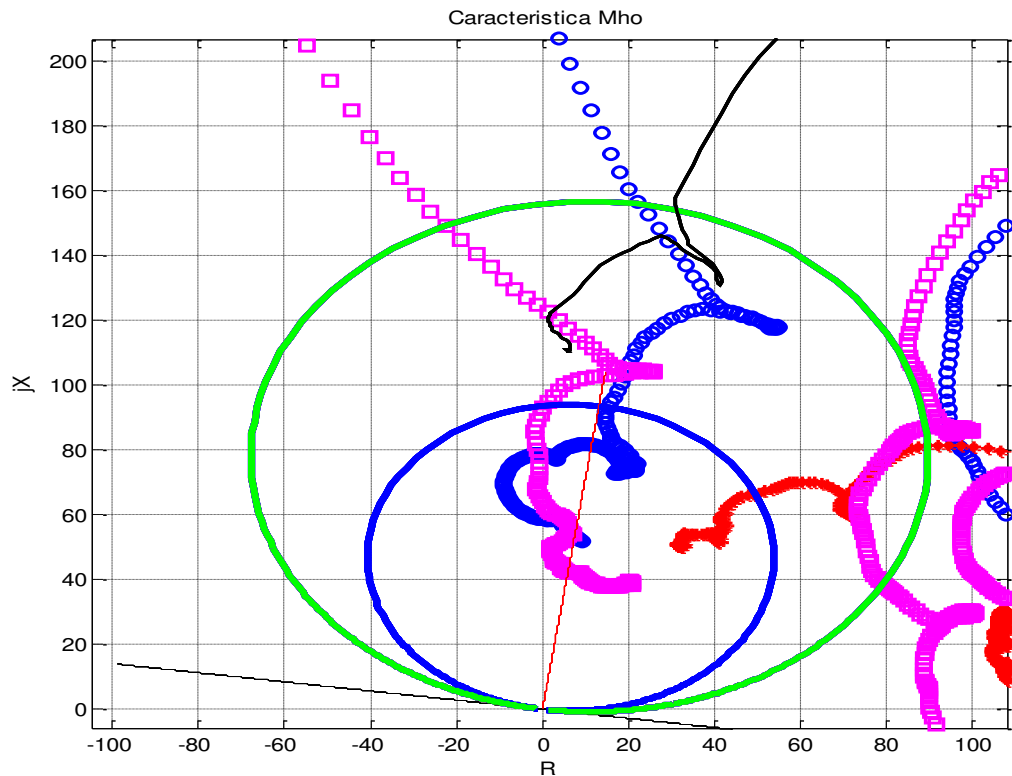


Figura 3.18. Compensaciones diferentes.

Esta figura muestra los diferentes niveles de compensación serie donde la impedancia aparente vista por el relevador cambian, significativamente. La impedancia aparente en la misma ubicación de falla puede caer en una zona de protección diferente según sea el porcentaje de compensación serie. Para este sistema de estudio los niveles de compensación fueron mostrados en la primera zona, a excepción del caso sin compensación (0%) que fue presentado en la segunda zona de operación. Los ajustes del alcance del relevador deben poder

adaptarse a los cambios en la compensación de la línea, sin una estimación precisa de los niveles de compensación, el relevador puede funcionar de manera incorrecta [23].

- Una solución para este problema es el ajuste de compensación en la característica del relevador, donde al ser incluido un pequeño voltaje en la señal de polarización en fase con la señal de operación se resuelve el problema [8].

Para este ajuste de compensación es recomendable lo siguiente:

- 1) Si la impedancia es inductiva, entonces no es necesario un ajuste de compensación. Sin embargo, si la impedancia es capacitiva, entonces la compensación de ajuste será la reactancia de la impedancia capacitiva neta.
  - 2) El ajuste de compensación no puede ser mayor que la impedancia inductiva, de lo contrario, el elemento se sobre compensaría.
- Otra solución es utilizar un método de alcance adaptable controlado por corriente [8]. En esta solución el alcance del relevador de distancia es reducido por el siguiente valor:

$$Z(|I|) = Z_{ajuste} - \frac{V_{prot}}{|I|} \cdot 1 \angle \text{angulo}(Z_{ajuste}) \quad (3.13)$$

Para corrientes grandes que causan que el *MOV* y el *airgap* conduzcan algo de corriente, estabilizando oscilaciones síncronas debido a los capacitores serie, el alcance es reducido para evitar que la zona se sobrealcance (ver Figura 3.19.a). Sin embargo, para corrientes muy grandes, cuando el capacitor es completamente corto circuitado el alcance no es reducido como es mostrado en la figura 3.19.b.

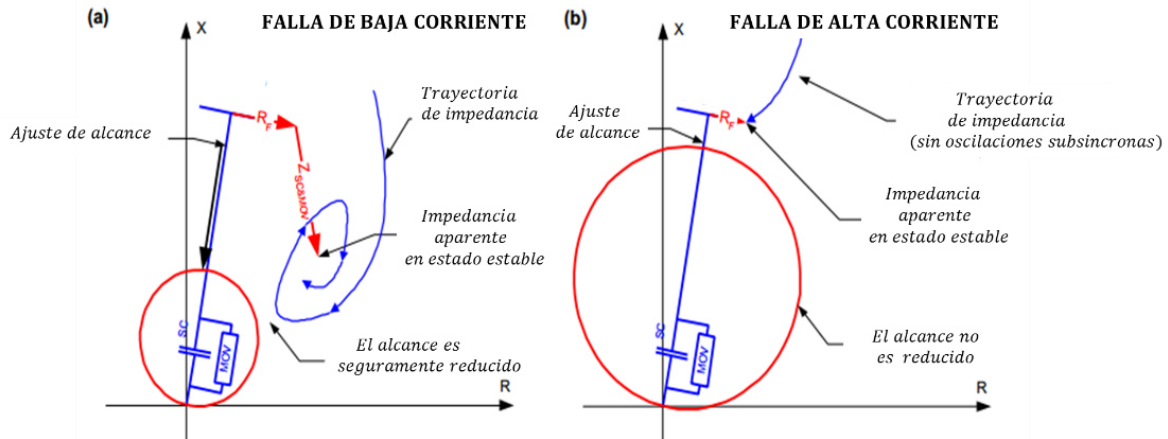


Figura 3.19. Ilustración del alcance adaptable dependiente de la corriente [8].

Se observa de igual manera que en los diferentes sistemas simulados se han generado componentes frecuenciales no filtradas por los filtros digitales convencionales como el filtro coseno y el filtro de Fourier utilizados en este relevador de distancia. Sin embargo, para esta investigación no se tomara en cuenta la estimación fasorial de las señales por medio de algún otro esquema de filtrado digital, sino se trabajara en el alcance del relevador desde el punto de vista de las señales de entrada al comparador aun por analizar.

### 3.4.2 Inversión de voltaje y corriente.

El capacitor serie al ser instalado hace que partes de la línea de transmisión sean capacitivas dependiendo de la ubicación de la falla. Esto puede llegar a crear una inversión de voltaje e inversión de corriente, debido a los efectos mencionados el relevador de distancia puede operar de manera incorrecta bajo estas condiciones. El término de “inversión” es definido por un desplazamiento por más de  $90^\circ$  con respecto a su posición “natural” de un fasor dado [8].

- Inversión de voltaje.

La inversión de voltaje es un problema común en las líneas con compensación serie, esto debido a cambios de fase significativos comparado con su posición natural, donde un cambio de  $90^\circ$  o más en el ángulo de fase del voltaje se conoce como “inversión de voltaje” [9], esto nos conduce a una estimación incorrecta de alcance y direccionalidad. Esta condición ocurre cuando se presenta una falla cerca y después del capacitor serie [6].

El voltaje en la ubicación del relevador y el voltaje a través del capacitor y el segmento de la línea, debe estar en retraso con la corriente por  $90^\circ$ . La inversión de voltaje ocurre cuando la impedancia total entre la fuente del sistema de potencia y el punto de la falla es inductiva, pero simultáneamente, la impedancia entre el relevador y el punto de falla es capacitivo, teniendo que la reactancia del capacitor es más grande que la reactancia positiva de la línea. Este efecto causa que el relevador de distancia vea una falla en la línea en sentido inverso. Dependiendo de donde se encuentre ubicado el transformador de voltaje (TP), el relevador será capaz de medir la inversión de voltaje.

Para una formulación matemática de la inversión de voltaje, se considera la figura 3.20, la cual muestra las reactancias de un sistema compensado en serie.

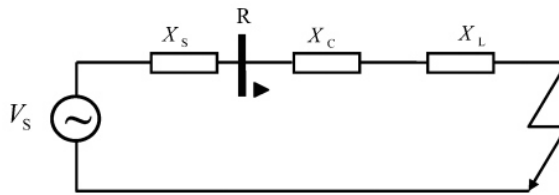


Figura 3.20. Diagrama de reactancia de una red compensada en serie.

Asumiendo  $X_s$  y  $X_L$  son reactancias inductivas, la corriente de falla a través del relevador es

$$I_R = \frac{V_S}{j(X_S + X_L - X_C)} \quad (3.14)$$

De la ecuación, se tiene que la corriente  $I_R$  se adelanta o atrasa  $90^\circ$  del voltaje, dependiendo del signo de  $X$  (donde  $X = X_S + X_L - X_C$ ). El voltaje en el relevador puede ser expresado de la siguiente manera,

$$V_R = jI_R(X_L - X_C) \quad (3.15)$$

$$V_R = \frac{V_S}{X}(X_L - X_C) \quad (3.16)$$

El voltaje en el relevador será invertido cuando las siguientes condiciones son realizadas

$$X_C > X_L \quad (3.17)$$

y

$$X_L + X_S > X_C \quad (3.18)$$

Un ejemplo de ello es presentado en la figura 3.21, donde los relevadores de fase que tienen los transformadores de medición de voltaje entre la falla y el capacitor serie declarara correctamente la dirección de la falla, sin embargo, los transformadores de medición de voltaje que se encuentren del otro lado del capacitor con respecto a la falla pueden operar incorrectamente [15]. Es decir, que cuando el relevador 1 de la barra S entre en operación incorrectamente puede declarar la falla 1 como una falla inversa, mientras que el relevador 2 funciona correctamente para la falla 2 pero incorrectamente para la falla 1.

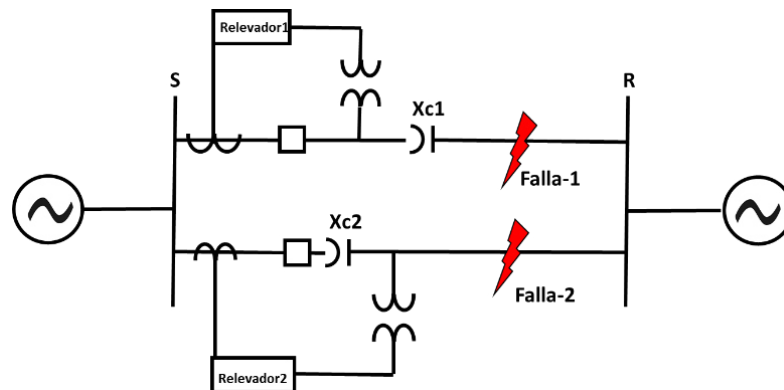


Figura 3.21. Inversión de voltaje por compensación serie [15].

Sin embargo para la simulación de la inversión de voltaje se tomó en cuenta el primer sistema mostrado anteriormente en la figura 3.10, donde el relevador de distancia presenta este efecto solo cuando se tiene el capacitor junto con los elementos de protección (*MOV y airgap*) en la terminal izquierda de la línea simulada. En la figura 3.22.b se muestra la trayectoria de la inversión de voltaje.

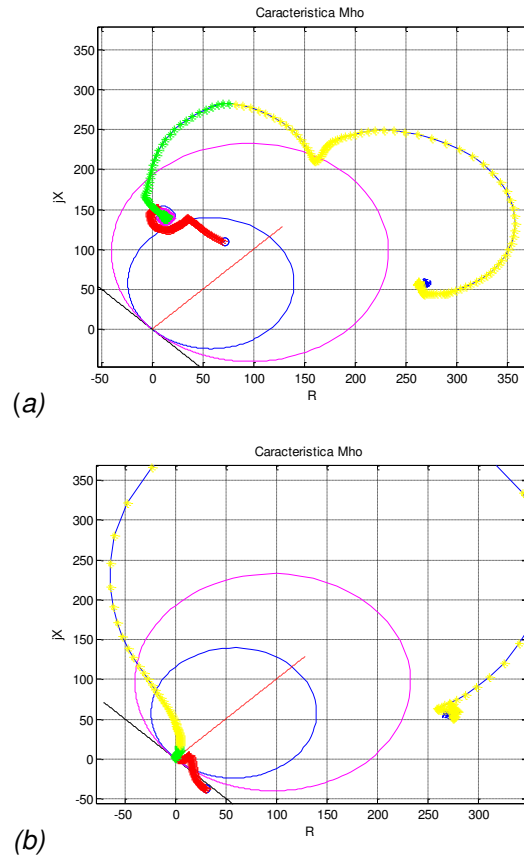


Figura 3.22.a. Simulación sin capacitor serie. b. Simulación de inversión de voltaje.

Se muestra en la figura 3.23 la señal para el caso de inversión de voltaje debido a una falla trifásica en el sistema.

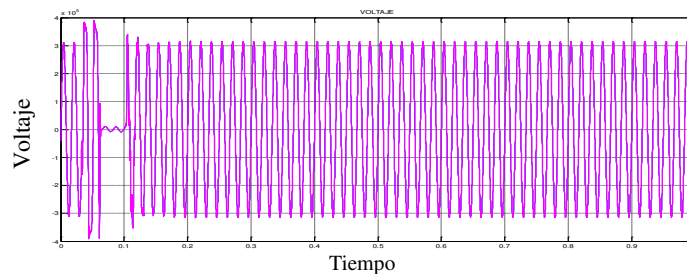


Figura 3.23. Señal de voltaje invertido.

Durante la condición de falla trifásica la energía disipada en el *MOV* (ver Figura 3.24.b) va aumentando gradualmente hacia el nivel del umbral permitido de  $23 \text{ MJ}$  hasta ser excedido después de 2 ciclos. Como resultado, el *airgap* cortocircuita el *MOV* y al capacitor descargando el voltaje inmediatamente a cero como es mostrado en la figura 3.24.c. Para esta condición se asume que la ***falla es de alta corriente***.

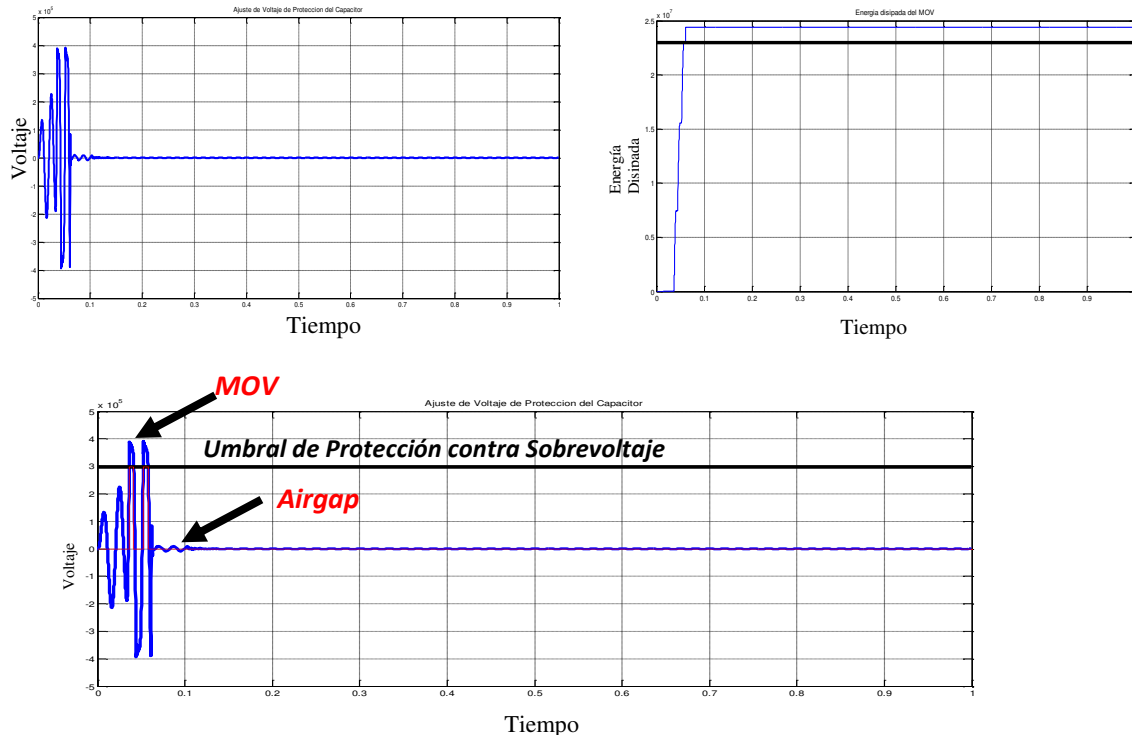


Figura 3.24. a. Voltaje en capacitor serie. b. Energía disipada en MOV.  
c. Sistema de protección.

Se tiene en la figura 3.25 el caso del mismo sistema de la figura 3.10, pero ahora con el capacitor en servicio cuando se presenta la inversión de voltaje, la simulación comienza en estado estacionario. En el *ciclo*  $t = 2$ , se aplica una falla trifásica, durante la falla el *MOV* se encuentra conduciendo en cada medio ciclo (ver Figura 3.25.b). La corriente de falla cae a un valor pequeño y la capacitancia serie comienza a descargarse a través de la falla. Continuamente la falla se apaga por completo, entonces el capacitor serie deja de descargarse y el voltaje comienza a oscilar como se muestra en la Figura 3.25.a.



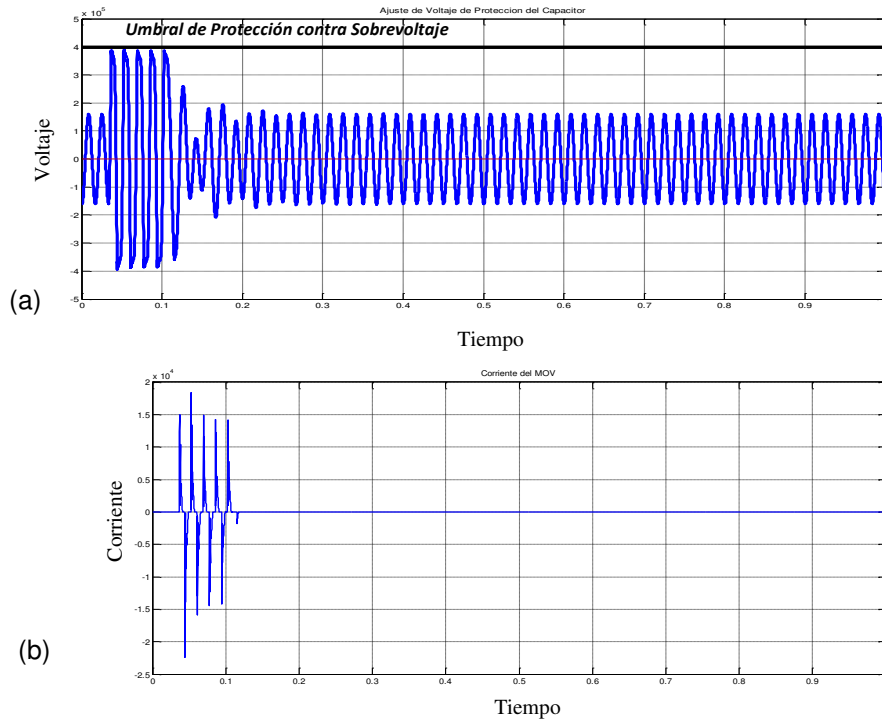


Figura 3.25. a. Voltaje en capacitor serie. b. Corriente en MOV.

Se puede asumir que la ***falla es de baja corriente***, entonces el *MOV* y el *airgap* no conducen, por lo tanto el capacitor serie se encuentra en servicio [8].

Para mitigar el problema de inversión de voltaje, debe ser posible reforzar el diseño de la aplicación del capacitor, de tal manera que la reactancia efectiva neta desde la posición del relé hasta la localización de la falla sea más inductiva que capacitiva.

- Inversión de corriente.

En sistemas de potencia con compensación serie, existe la posibilidad que cuando es presentada una falla, la impedancia entre la fuente del sistema de potencia y el punto de falla sea capacitiva, si esto ocurre, la corriente de falla será capacitiva más que inductiva. Esta condición es conocida como inversión de corriente [24]. Una inversión de corriente no solo impacta la corriente durante la condición de falla, también puede llegar a perjudicar al voltaje en sistema de potencia. Cuando es presentada una falla delante de la línea, la corriente en el relevador se adelanta del

voltaje por  $90^\circ$  debido a la reactancia capacitiva en el lazo de falla. Al ser presentado este efecto, el relevador también falla para proporcionar una decisión correcta de direccionalidad.

La condición para la inversión de corriente es,

$$X_C > X_L + X_S \quad (3.19)$$

Sin embargo, para esta condición es poco probable que ocurra el evento de inversión de corriente, debido a que la corriente de falla es tan alta y en consecuencia el MOV entra en funcionamiento, reemplazando al capacitor. Por lo tanto, el MOV mantiene la falla inductiva así previniendo la inversión de corriente.

Estos efectos provocados por la compensación de capacitores series a la protección de líneas de transmisión han sido tratados de diferentes maneras, donde es necesario una evaluación muy cuidadosa para la elección y aplicación del relevador.

- Se han realizado varios análisis para evitar estos efectos al tener instalado el capacitor serie en la línea. Se ha determinado el óptimo alcance de la primera zona para disminuir la reactancia serie de la línea de transmisión, donde se considera:

$$Z_r - jX_C \quad (3.20)$$

Donde  $Z_r$  es la impedancia de la línea protegida, y  $X_C$  la reactancia del capacitor [26].

- Para este caso de análisis se tomó en cuenta el sistema de la figura 3.14, de la figura 3.15 se observó que se tiene un sobrealcance hacia la zona 1. Sin embargo, para este análisis se determinó una reducción de la primera zona (Ver Figura 3.26) para evitar **sobrealcances** producidos por la inversión de voltaje y/u oscilaciones subsincrona.

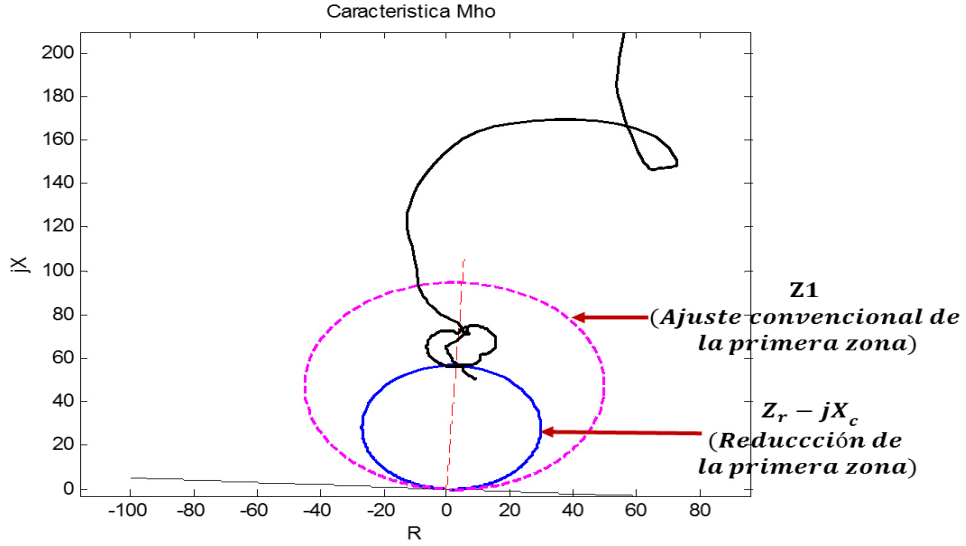


Figura 3.26. Reducción de la primera zona.

- También ha sido abordado el problema de inversión de voltaje por medio de *memoria de voltaje y polarización cruzada* para la medición direccional adecuada [27].
- Posibles errores de operación para fallas inversas pueden ser también evitados por el uso apropiado de elemento direccional, el voltaje medido puede ser compensado para superar los problemas de inversión de voltaje [10]. Donde se tiene una compensación mínima necesaria como:

$$V_{2comp} = V_2 - jI_2 * (X_{s2} - X_c) \quad (3.21)$$

Si la impedancia de la fuente no es conocida, la compensación deberá ser:

$$V_{2comp} = V_2 + jI_2 * X_c \quad (3.22)$$

Esta tesis de investigación es enfocada a las soluciones adaptables en el relevador de distancia para líneas de transmisión compensadas, donde los relevadores son equipados con una característica de impedancia adaptable para que cada elemento de fase y tierra puedan ser ajustados con flexibilidad a características apropiadas que dispone el compensador trabajando desde su señal de operación.

Tabla 3.3 Efectos de compensación serie en el relevador de distancia.

Efecto de compensación serie	Consecuencias	Problemas con el relevador de distancia
<b>Cambio inesperado en la impedancia de la línea en el punto de compensación serie.</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobrealcance</li> <li>• En fallas cercanas a la compensación, el relevador puede ver fallas en dirección contraria.</li> </ul>
<b>Capacitor cortocircuitado por el <i>airgap</i> para protección de sobrevoltaje.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produce transitorios de baja frecuencia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobrealcance.</li> </ul>
<b>El MOV es usado para protección de sobrevoltaje del capacitor.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corriente de falla baja: impedancia=reactancia capacitiva.</li> <li>• Corriente de falla alta: impedancia= reactancia capacitiva y resistencia del MOV.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cambio de impedancia.</li> <li>• Sobrealcance del relevador.</li> </ul>
<b>Inversión de voltaje.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Angulo de la fase de voltaje desplazado más de 90°.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobrealcance.</li> <li>• Un potencial subalcance si la falla ocurre solo después del capacitor (dirección contraria).</li> </ul>
<b>Inversión de corriente.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Angulo de la corriente desplazado 90°</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El relevador falla al operar para una porción de la línea.</li> </ul>
<b>Sub armónicos.</b>		

### 3.5 ACOPLAMIENTO MUTUO.

Los problemas con la protección con líneas compensadas en serie son incrementados cuando se presenta la configuración de líneas paralelas, siendo estas presentadas con un recorrido geográfico cercano entre circuitos, dando como resultado al acoplamiento mutuo entre los circuitos. La reactancia capacitiva al tener instalado el capacitor serie, reduce la reactancia propia de la línea en secuencia cero de la red, de este modo causando una influencia más grande de acoplamiento mutuo [28]. El “efecto” de acoplamiento mutuo puede ser entre fases y/o entre fase y tierra, sin embargo, para las líneas paralelas causados por

corrientes de secuencia negativa y positiva son muy pequeñas y se consideran insignificantes [29], pero en el caso de acoplamiento de secuencia cero el efecto no debe ser ignorado.

En general, de la tabla 2.1 se tiene que los relevadores de distancia de fase a tierra, estiman la impedancia usando la siguiente ecuación,

$$Z_R = \frac{V_{an}}{I_r} = \frac{V_{an}}{I_{an} + k_0 \cdot I_0} \quad (3.23)$$

$$k_0 = \frac{Z_{Lo} - Z_{L1}}{Z_{L1}} \quad (3.24)$$

donde  $Z_R$  es la impedancia vista por el relevador,  $V_{an}$  es el fasor de voltaje de la fase con falla en el punto del relevador,  $I_{an}$  es el fasor de corriente de la fase fallada,  $I_0$  es la corriente de secuencia cero,  $Z_{Lo}$  es la impedancia de secuencia cero de la línea de transmisión y  $Z_{L1}$  es la impedancia de secuencia positiva de la línea. Sin embargo, en el caso de líneas de doble circuito, debido al acoplamiento mutuo de secuencia cero,  $Z_R$  es diferente a la impedancia de la ecuación (3.23). Para ese caso se tiene  $Z_R$ ,

$$Z_R = \frac{V_{an}}{I_r} = nZ_{L1} \left( 1 + \frac{Z_{m0}}{Z_{L1}} \cdot \frac{I_{B0}}{I_r} \right) \quad (3.25)$$

donde  $n = (l/L)$  es la longitud por unidad de la sección de la línea del relevador hacia el punto de falla,  $l$  es la longitud de la línea,  $L$  es la longitud total de la línea,  $Z_{m0}$  es la impedancia mutua de secuencia cero de las líneas e  $I_{B0}$  es la corriente de secuencia cero del sonido de la línea [33]. La impedancia mutua puede ser tan alto como el 50-70% de la impedancia-propia. Debido a la inductancia mutua entre los conductores de las fases correspondientes de las dos líneas, se inducen voltajes en la fase de un circuito por la corriente en la fase correspondiente del otro circuito [31].

El relevador de distancia con líneas de transmisión paralelas con compensación serie puede llegar a funcionar incorrectamente debido a la presencia del acoplamiento mutuo de secuencia cero, ya que puede provocar que el relevador se sobre-alcance o sub-alcance, dependiendo de la dirección de la corriente de secuencia cero de las líneas paralelas contra la corriente compensada [4, 32, 33], como también puede llegar a generar errores en la actuación de las protecciones.

- En el caso de fallas remotas, donde la corriente de secuencia cero fluye en dirección opuesta, el acoplamiento mutuo causa que el relevador se sobrealcance.
- En el caso de fallas cercanas al bus, donde la corriente de secuencia cero puede fluir en la misma dirección, el acoplamiento mutuo causa que el relevador se subalcance.

A continuación se presentan los casos con su respectivo circuito equivalente que fueron implementados en la simulación de líneas de transmisión con acoplamiento mutuo y además compensación serie. Estos se clasifican en tres tipos.

#### 1. Sistema general con bus diferentes.

Estas líneas mutuamente acopladas son aquellas que no empiezan, ni terminan en ningún bus en común, es decir, son redes con fuentes de secuencia positiva, negativa y cero diferentes, como es mostrado en la figura 3.27.

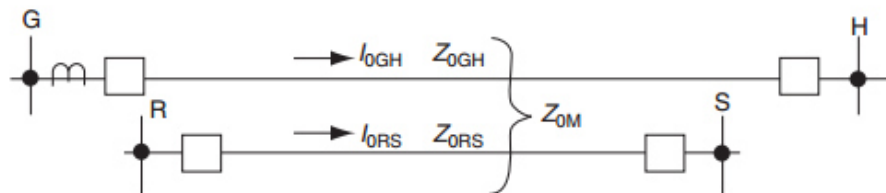


Figura 3.27. Sistema general de líneas en paralelo con acoplamiento mutuo [4].

Para el análisis del circuito equivalente mostrado en la figura 3.28, se utiliza un transformador ideal de relación 1:1 para de esta forma el acoplamiento mutuo  $Z_{0M}$  se encuentre en ambos circuitos pero estando aislados eléctricamente [4].

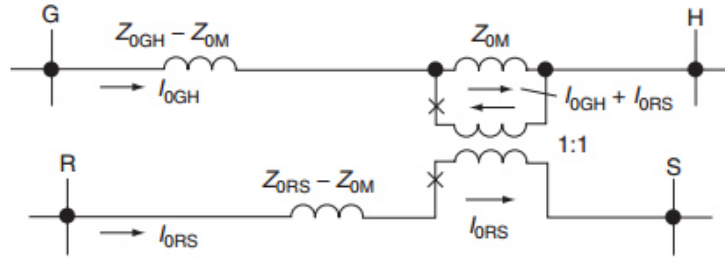


Figura 3.28. Circuito equivalente del sistema general [4].

Se obtienen las siguientes ecuaciones,

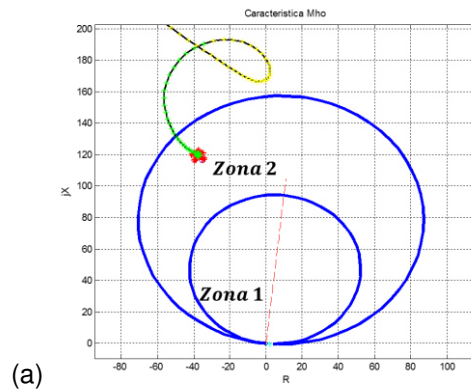
$$V_{GH} = Z_{0GH}I_{0GH} + Z_{0M}I_{0RS} \quad (3.26)$$

$$V_{RS} = Z_{0RS}I_{0RS} + Z_{0M}I_{0GH} \quad (3.27)$$

Una vez que se obtiene el valor de la impedancia mutua de secuencia cero  $Z_{0M}$  en ohms, entonces se puede obtener el valor de dicha impedancia en *p.u.* al llevar a cabo la ecuación (3.28).

$$Z_{0M} = \frac{MVA_{BASE}Z_{0M}(ohms)}{KV_GKV_R} \quad (3.28)$$

- En este caso al ser simulado se tomó en cuenta los parámetros de la tabla 3.2, correspondientes al segundo sistema mostrado en la figura 3.14. De principio se realizó la prueba del sistema con una falla trifásica y *acoplamiento mutuo sin compensación serie*. En la figura 3.29 se muestra la zona 1 y la zona 2 del relevador, utilizando una característica tipo mho;



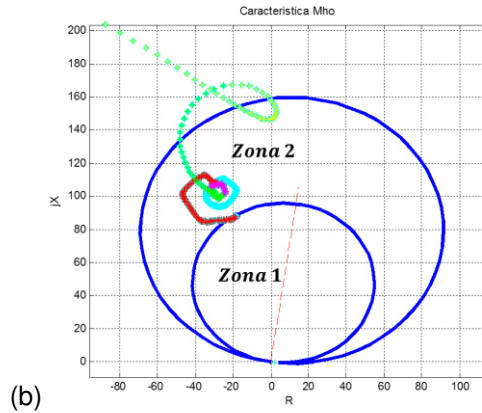


Figura 3.29. Alcance del relevador con característica mho a. Con acoplamiento mutuo.  
b. Con acoplamiento mutuo y compensación serie en diferentes buses.

En la figura 3.29.a se muestra la falla trifásica en el sistema sin compensación, en esta primera prueba es presentada la impedancia vista por el relevador en la zona 2 del relevador, sin embargo en la segunda prueba en el sistema, se es realizada *con acoplamiento mutuo y además compensación serie al 60%*, el relevador opera de forma incorrecta, debido a que se presenta un sobrealcance hacia la zona 1 operando el relevador en la zona 1 y no en la zona 2 donde realmente debería ocurrir la falla (Ver figura 3.29.b).

## 2. Sistema de líneas paralelas con 1 bus en común.

Este tipo de redes son definidas con fuentes comunes de secuencia positiva, pero con diferentes fuentes de secuencia cero. En este sistema, ilustrado en la figura 3.30, la trayectoria de las dos líneas mutuamente acopladas son originadas en un bus común y finalizando en buses diferentes [4].

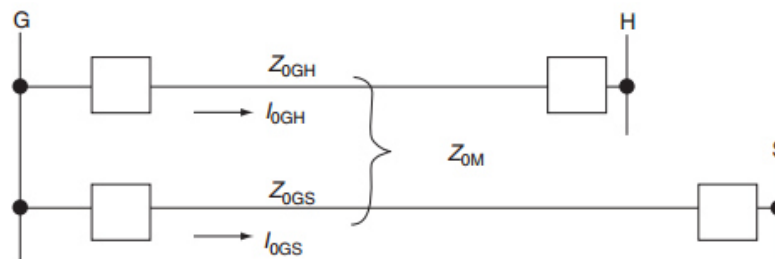


Figura 3.30. Líneas paralelas con 1 bus común y acoplamiento mutuo [4].



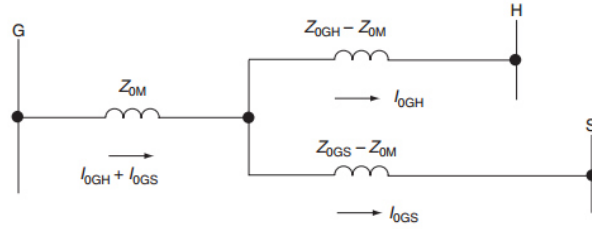


Figura 3.31. Circuito equivalente con un bus común y acoplamiento mutuo [4].

- Para este sistema de igual manera se realizaron las dos pruebas de *acoplamiento mutuo* y *acoplamiento mutuo junto con compensación serie*.

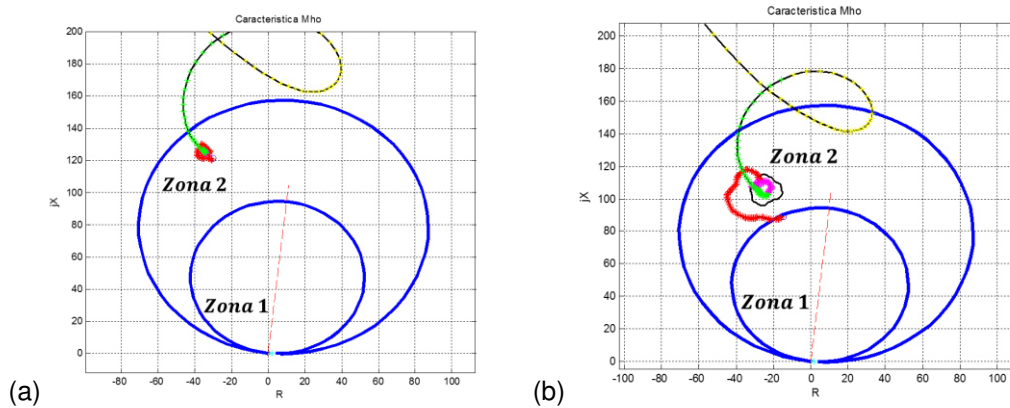


Figura 3.32. Alcance del relevador con característica mho a. Con acoplamiento mutuo.  
b. Con acoplamiento mutuo y compensación serie con 1 bus en común.

En la figura 3.32.a es presentada la impedancia vista por el relevador en la zona 2 del relevador, sin embargo en la segunda prueba el relevador opera de forma incorrecta, debido a que se presenta un sobrealcance hacia la zona 1 como se muestra en la figura 3.32.b.

### 3. Sistema de líneas paralelas con los 2 bus en común.

Para el sistema donde las líneas paralelas con acoplamiento mutuo comparten los 2 buses, donde ambas líneas terminan en un bus común en ambos extremos de las líneas, para este caso se tendrá la misma impedancia  $Z_{0GH}$ . También es definido como fuentes de secuencia positiva y de secuencia cero en común, como es mostrado en la figura 3.33.

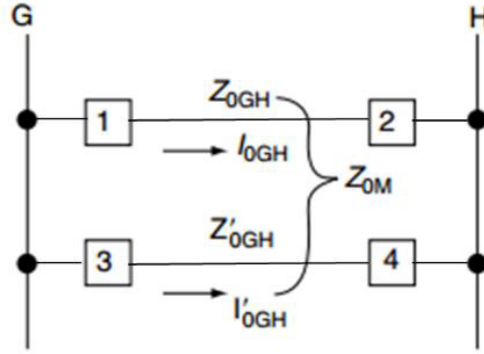


Figura 3.33. Líneas paralelas con ambas terminales y acoplamiento mutuo [4].

La línea acoplada con dos buses comunes tiene una impedancia  $Z_{0GH}$ , y la impedancia equivalente entre el bus G y H se muestra a continuación,

$$\begin{aligned} Z_{eqGH} &= Z_{0M} + \frac{1}{2}(Z_{0GH} - Z_{0M}) \\ &= \frac{1}{2}(Z_{0GH} + Z_{0M}) \end{aligned} \quad (3.29)$$

Si  $Z_{0M} = 0.7Z_{0GH}$ , entonces,  $Z_{eqGH} = 0.85Z_{0GH}$

Así, cuando las corrientes fluyen en la misma dirección, se tiene un aumento de la impedancia de secuencia cero entre los buses ya que sin el acoplamiento se tendría una impedancia equivalente de  $0.50Z_{0GH}$ .

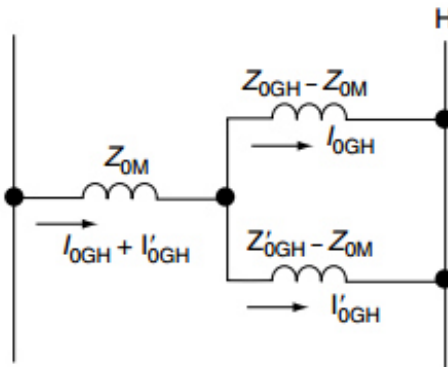


Figura 3.34. Circuito equivalente de líneas paralelas con ambas terminales [4].

- Para este caso se presentó el mismo evento que en casos anteriores.

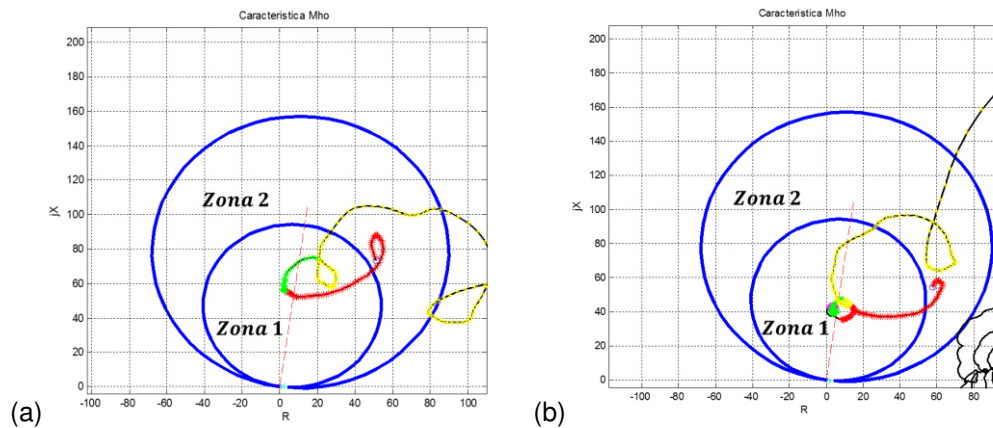


Figura 3.35. Alcance del relevador con característica mho a. Con acoplamiento mutuo.  
b. Con acoplamiento mutuo y compensación serie con 2 bus en común.

Una vez teniendo los resultados de las simulaciones anteriores, cada una con sus condiciones particulares, podemos analizar los problemas que conlleva cada uno, así es de gran interés que se consideren durante el diseño de la protección de distancia, con el fin de determinar si los equipos instalados actúan adecuadamente ante las fallas que se presentan en el sistema.

- Sin embargo se han propuesto diferentes tipos de protección y algoritmos con el fin de mitigar algunos de los problemas relacionados con el acoplamiento mutuo. Pero, ninguno de los esquemas ha propuesto una solución completa para los efectos en líneas de transmisión paralelas considerando compensación serie y acoplamiento mutuo, debido a que se tiene un sistema aleatorio donde los parámetros pueden llegar a variar en cualquier instante de tiempo, por la presencia de varios tipos de fallas o diferentes ubicaciones de las fallas en las líneas de transmisión paralelas compensadas en serie combinadas con el efecto de acoplamiento mutuo, donde esto hace que el sistema de protección sea bastante complicado de analizar.

### 3.6 CONCLUSIONES.

Como fue mencionado, el capacitor serie es de gran impacto en las redes eléctricas por sus esquemas característicos de operación y por su bajo costo en comparación con otros esquemas de compensación, por ello fue llevado a la tarea de realizar su modelado a fin de analizar los efectos ante el relevador de distancia.

Al ser presentado el esquema del capacitor serie junto con sus dispositivos de protección, el cual es utilizado para incrementar la transferencia de potencia de las líneas de transmisión, se observa que se tiene error en la operación del relevador de distancia, debido a la reactancia capacitiva.

Sin embargo, al tener caracterizado el problema y los efectos que se tienen, es de entendimiento que la protección de distancia convencional es inadecuada para la operación ante fallas, debido al comportamiento no lineal de los capacitores serie y el *MOV* en el momento de la falla, donde un sobrealcance en el relevador de distancia es una de las consecuencias más críticas presentadas. Además, al ser también instalados en líneas de doble circuito se puede llegar a iniciar una inestabilidad de gran magnitud en el sistema.

Por ello, es necesario desarrollar un esquema nuevo del relevador de distancia, desarrollando diferentes características de operación que pueden llegar a ser adaptables para una mejor discriminación mediante el uso de los comparadores, donde se tome en cuenta estos efectos y puedan ser una adecuada protección para las líneas de transmisión con compensación serie en serie.

## **CAPÍTULO 4.**

### **PROPUESTA MITIGACIÓN DEL PROBLEMA.**

#### **4.1 INTRODUCCIÓN.**

De acuerdo a lo visto en la sección 2 se observó cómo se genera la característica del relevador estático de distancia en estado estable con las señales de entrada al comparador de fase convencional mostrada en las ecuaciones (2.4), es decir, la característica que pasa por el origen. Sin embargo, se tiene desventajas al tener esta característica convencional, ya que al ser usada a lo largo de una línea en algunos casos el alcance no cubre la zona suficientemente a lo largo del eje R, y es incapaz de detectar fallas grandes.

También se logró observar en la sección anterior los efectos que se generan en el relevador de distancia al instalar los capacitores serie en las líneas de transmisión. Por lo tanto, en este capítulo se analizan y se proponen los métodos para la mitigación de estos problemas, utilizando funciones de adaptación en el relevador de distancia. Se realiza una comparación de las características del relevador convencional, con ajuste dinámico en la señal de polarización y por último se tiene la propuesta de esta tesis con ajuste en la señal de operación.

#### **4.2 ESTADO DEL ARTE DE CARACTERÍSTICA ADAPTABLE.**

Con el paso de los años se han propuesto varias soluciones para la mitigación del problema que se tiene en los relevadores de distancia al ser instalado el capacitor, donde se ha tomado en cuenta la señal de polarización a la entrada del comparador. En [16] durante condiciones de falla se utilizó una técnica de ajuste de evaluación básica de la primera zona del relevador de distancia, donde será reducida con respecto a criterios convencionales como es visto en la figura 4.1.

donde “D” es el grado de compensación de la línea dado como,

$$D = \left[ \frac{X_L}{X_C} \right] \cdot 100 \quad (4.1)$$

$X_C$  y  $X_L$  son las reactancias del banco de capacitores y de la línea respectivamente. El valor “P” corresponde al alcance máximo permitido de la primera zona. Esto quiere decir, que dependiendo del porcentaje de compensación “D” será el alcance de la primera zona del relevador de distancia.

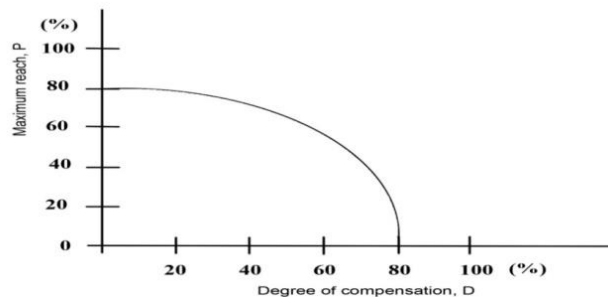


Figura 4.1. Alcance máximo de la primera zona con grado de compensación.

Sin embargo, la primera tentativa es utilizar voltajes de las fases sanas para polarizar al relevador. Un número de técnicas de polarización han sido usadas en el desarrollo de las funciones de las características del relevador de distancia de fase y tierra.

A continuación se detallan algunas técnicas de polarización:

- **Auto Polarización**, utiliza el voltaje del lazo de fase fallada como una cantidad de polarización, como ejemplo se tiene el voltaje  $V_a$  para el lazo de la fase A,  $V_{ab}$  para el lazo de la fase AB, etc. Como resultado, se tiene una característica estática, ya que no cambia con condiciones del sistema, fallas o tiempo.
- **Polarización cruzada**, utiliza voltajes de lazo de fases sin falla como cantidad de polarización. La característica mho producida se llama mho variable, debido a sus formas variables para diferentes sistemas y condiciones de falla.

- **Polarización combinada**, está basada en la polarización de memoria voltaje de secuencia positiva. El voltaje de secuencia positiva proporciona una propia combinación de auto-polarización y polarización cruzada.
  - **Polarización de memoria**, utiliza cantidades memorizadas del *auto-polarización o polarización cruzada* como cantidad de polarización. Teniendo de esta manera una característica dinámica.
- Cuando el relevador usa algún otro tipo de polarización en una característica tipo mho esta puede cambiar la característica de operación, donde un cambio es la expansión *dinámica* de la misma característica [34].
- Sin embargo, cuando la característica mho del relevador de distancia utiliza la técnica de auto polarización y se es presentada la inversión de voltaje, es posible que se vea la falla en dirección inversa debido a este efecto. Para superar este problema de inversión, es común usar un relevador mho con memoria de polarización usando una memoria de voltaje de secuencia positiva, como valor de polarización, en la figura 4.2 se llevó a cabo la reproducción de este método [35].

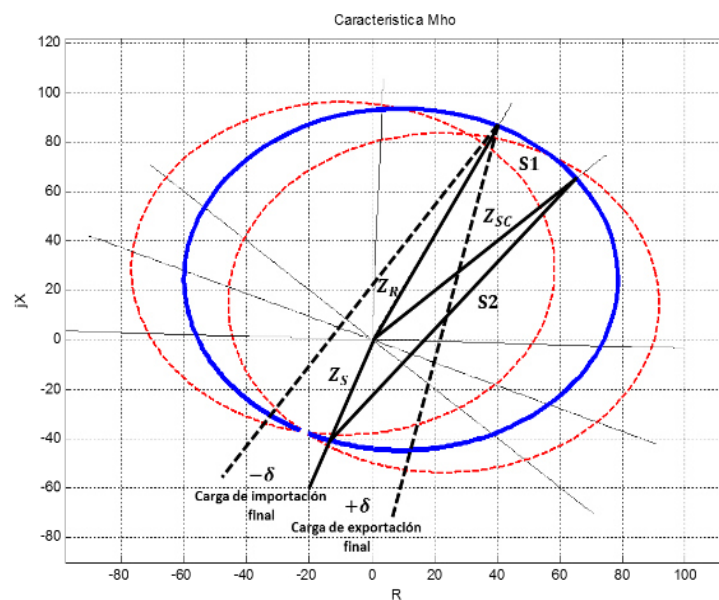


Figura 4.2. Mho polarizado para fallas hacia adelante.

En esta figura  $Z_{SC}$  es la impedancia de la línea entre el relevador y el punto de falla.  $Z_R$  es el ajuste de alcance. Para mediciones del ángulo entre  $S1$  y  $S2$  en la figura 4.2, en lugar de  $S1$  y  $Z_{SC}$  como es el caso del relevador auto-polarizado, la falla es correctamente vista en dirección hacia adelante incluso si es puramente capacitivo.

De acuerdo con la figura para fallas adelante la condición donde el flujo de carga y el flujo de corriente de falla son opuestos es una condición favorable desde el aspecto de sobrealcance, ya que los voltajes de polarización y operación son ambos desplazados en la misma dirección [35]. Es de suma importancia mencionar que esto fue realizado mediante una simulación en el programa *Matlab*®.

- Como fue mencionado anteriormente, la polarización cruzada usa las fases no falladas durante una falla [36]. Por ejemplo, un elemento  $BC$  puede utilizar un vector de voltaje desplazado de  $V_A$  para la polarización en lugar de  $V_{BC}$ . Se ha llevado a cabo en [36, 37] un esquema de polarización adaptable donde el relevador utiliza un voltaje de memoria de secuencia positiva  $V_{1mem}$ , como es mostrado en la ecuación (4.2).

Para este análisis se tiene el vector  $dZ$  que es definido como la impedancia entre la falla y el punto de alcance del relevador como es mostrado en (4.2)

$$dZ = Z_r - Z \quad (4.2)$$

donde una diferencia de ángulos entre  $dZ$  y  $Z$  representada en una componente real, siendo calculada por la fórmula de Euler, se tiene

$$Re[dZ \cdot Z^*] = |dZ| \cdot |Z| \cdot \cos(\theta_{dZ} - \theta_Z) \quad (4.3)$$

Sustituyendo (4.2) dentro de (4.3) se tiene (4.4)

$$Re[(Z_r - Z) \cdot Z^*] \quad (4.4)$$



Expresando esta ecuación en términos de voltaje como se muestra en (4.5), multiplicando cada termino por corriente, donde  $V$  es el voltaje medido en el relevador e  $I$  es la corriente del lazo de falla,

$$Re[(Z_r \cdot I - V) \cdot V^*] \quad (4.5)$$

$$Z_r = \frac{Re[V \cdot V^*]}{Re[1 \angle \theta_{Z_r} \cdot I \cdot V^*]} \quad (4.6)$$

Así de esta manera podemos reemplazar el voltaje de auto polarización con el voltaje de memoria de secuencia positiva  $V_{1mem}$

$$Z_r = \frac{Re[V \cdot V_{1mem}]}{Re[1 \angle \theta_{Z_r} \cdot I \cdot V_{1mem}]} \quad (4.7)$$

El numerador de (4.7) contiene el término  $V$  que fue derivado de  $dV$  (cantidad de operación) que puede cambiar por  $180^\circ$  grados, dependiendo de la ubicación de la falla. Para ver estas ecuaciones de forma visual, se tiene la figura 4.3 donde se obtuvo este tipo de característica al ser llevado a cabo en el programa *Matlab*®, los valores para la representación en el diagrama complejo fueron escogidos aleatoriamente.

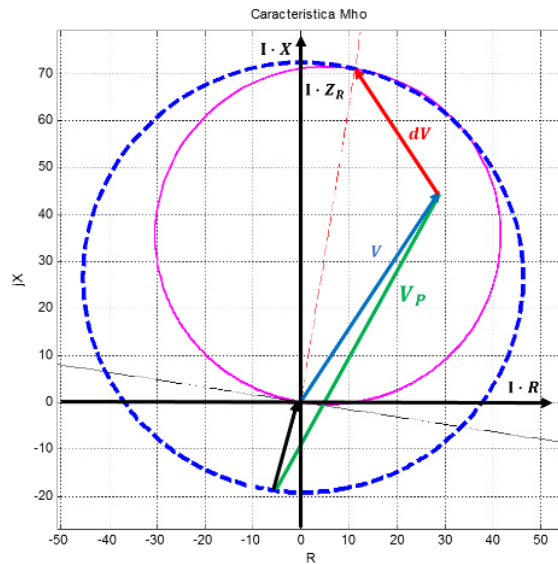


Figura 4.3. Característica mho dinámica en plano de voltaje.

Durante una falla, el voltaje de auto-polarización en el relevador disminuye en las fases falladas, mientras que la memoria de voltaje ( $V_{1mem}$ ) decae lentamente de los niveles de pre-falla [36]. Esto hace que la característica mho con memoria polarizada sea más grande que la característica auto-polarizada, debido a que la comparación de ángulos es ahora entre  $V_p(V_{1mem})$  y  $dV$ , como es mostrado en la figura 4.3.

Sin embargo, en un plano de impedancia, esto quiere decir que la magnitud de la impedancia medida  $Z$  es significativamente menor que la impedancia de polarización  $Z_p$ , entonces la característica dinámica mho se mueve del origen, como es mostrado en la figura 4.4 [36]. La impedancia de polarización  $Z_p$  es calculada dividiendo  $V_{1mem}$  por el lazo de corriente. Si son ignorados los efectos del flujo de carga,  $V_{1mem}$  inicialmente es igual al voltaje de la fuente, por lo tanto, en este caso  $Z_p$  es igual a la impedancia de la fuente más la impedancia aparente medida por el relevador.

Sin embargo, para esta condición fue utilizado un *10-20% del voltaje nominal*.

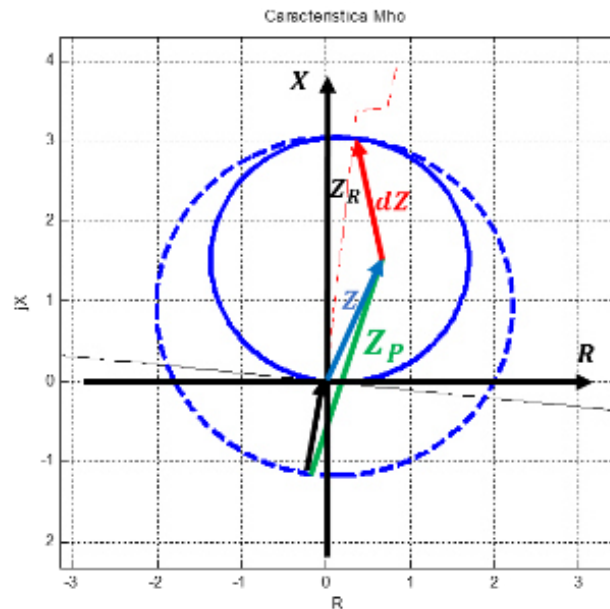


Figura 4.4. Característica mho dinámica en plano de impedancia.

Se han realizado diferentes investigaciones para el diseño de los relevadores de distancia, se ha utilizado un circuito de memoria en la señal de polarización para “recordar” el voltaje de pre falla durante el tiempo suficiente para poder tomar la decisión de si la falla (fallas cercanas a la localización del relevador) ocurrió enfrente o detrás del relevador [1, 9, 34]. En el momento de ocurrir la falla, el voltaje inicial de polarización es igual al voltaje de la fuente que se encuentra atrás del relevador  $V_{AB}(fuente)$ , es decir, el voltaje de pre falla, que es diferente al voltaje  $V_{AB}$  de la falla [36]. El ángulo  $\beta$ , existente entre el voltaje inicial de polarización  $V_{AB}(fuente)$  y el de operación  $V_{op}$ , es el responsable de producir la característica dinámica inicial.

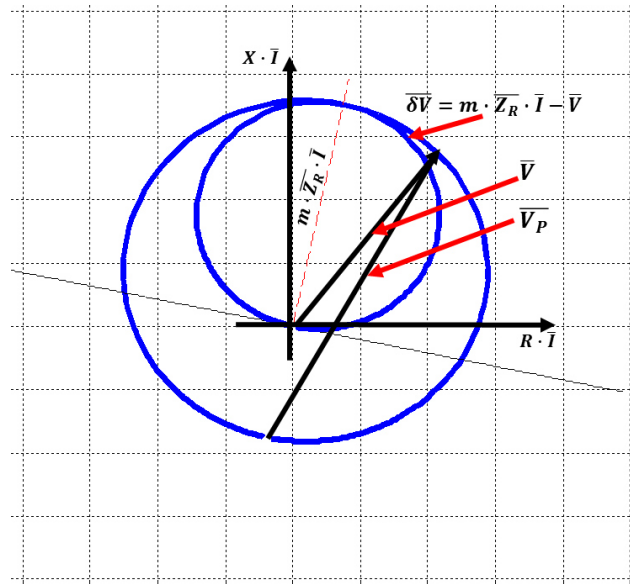


Figura 4.5. Característica mho dinámica.

- En [15] se realizó un análisis por medio de cantidades de polarización o voltajes de referencia  $\overline{V}_p$ , donde se demuestra que para fallas cercanas al relevador la cantidad de polarización  $\overline{V}_p$  no es afectada, estas cantidades para una característica mho son voltajes de secuencia positiva o voltaje de fase sin falla, utilizando información de voltaje lado línea (memoria de voltaje de pre-falla) para mejorar la discriminación direccional del relevador. De esta manera puede ser resultado el efecto de inversión de voltaje y problema de fallas trifásicas (Ver figura 4.5).

Para el sistema de estudio con líneas compensadas en serie, la memoria de voltaje debe ser lo suficientemente grande hasta que los elementos del relevador liberen la falla [15].

- Cuando se lleva a cabo una memoria de voltaje de secuencia positiva en la señal de polarización, esta desplaza la circunferencia de la característica mho al tercer cuadrante para resolver el problema de inversión de voltaje, de esta manera extendiéndose desde la impedancia de la fuente  $Z_S$ , hasta el ajuste de impedancia del relevador  $Z_r$  [38]. La figura 4.6 muestra la característica en un plano de impedancia para dos diferentes tipos de fallas.

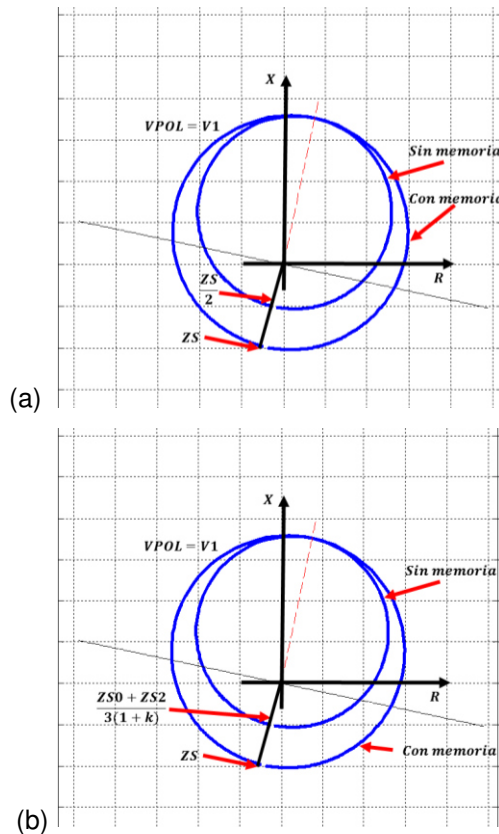


Figura 4.6. Elemento de respuesta. a. para falla BC hacia adelante. b. falla de fase a tierra.

Las cantidades de polarización para una memoria de polarización de secuencia positiva son mostradas en la tabla 4.1 para seis lazos de falla.

Tabla 4.1 Efectos de compensación

Unidad	Memoria de voltaje de secuencia positiva	Corriente
Fase-Tierra		
AT	$V_{A1m}$	$I_A + k_0 * I_{RES}$
BT	$V_{B1m}$	$I_B + k_0 * I_{RES}$
CT	$V_{C1m}$	$I_C + k_0 * I_{RES}$
Fase-Fase		
AB	$-j * V_{C1m}$	$I_a - I_b$
BC	$-j * V_{A1m}$	$I_b - I_c$
CA	$-j * V_{B1m}$	$I_c - I_a$

- En la figura 4.7 se muestra como un relevador puede determinar cantidades de polarización en la memoria de voltaje de secuencia positiva desde de los voltajes trifásicos [38].

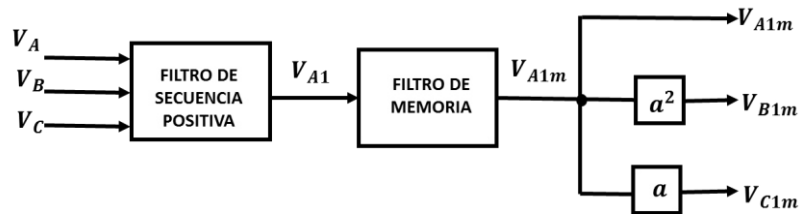


Figura 4.7. Diagrama de bloque de voltaje polarizado de secuencia positiva.

Los relevadores con memoria de voltaje en su señal de polarización resultan de gran atracción para el problema en esta tesis, debido a que cuando se presentan fallas trifásicas, donde por consecuencia, no se tiene disponible una fase de voltaje saludable, esta memoria sirve de gran utilidad [1].

Para esta condición un **10-20% del voltaje nominal** es suficiente para ser utilizado, por lo cual se tiene como resultado una característica dinámica del relevador.

La característica dinámica no es de tamaño fijo, varía proporcionalmente con la impedancia de la fuente directamente detrás de la función. El flujo de la carga causara que la característica dinámica gire a la izquierda o a la derecha según sea el alcance, de esta manera permitiendo que el giro y la variabilidad de la característica se ajuste más resistencia en la falla.

*Esta característica dinámica ofrece las siguientes ventajas:*

- Tiene más alcance en el eje R que la característica convencional en estado estable.
- Operación confiable para fallas trifásicas altas enfrente del relevador, donde el voltaje puede llegar a cero.
- Permite el alcance dinámico para fallas capacitivas (inversión de voltaje) enfrente del relevador.

A pesar, de las ventajas que se llegan a tener se debe tomar en cuenta el voltaje de polarización más adecuado dependiendo de las condiciones del sistema (parámetros de ajuste), casos de falla, magnitud de voltaje y el tiempo transcurrido después del inicio de la falla [1]. Para este caso, los relevadores de distancia con memoria en su señal de polarización tienen, además de la característica en estado estable, la característica dinámica, la cual protege a la línea de transmisión inmediatamente después de haber ocurrido la falla. Sin embargo, para esta investigación se propone mitigar el problema desde la señal de operación en el comparador del relevador de distancia.

### 4.3 MITIGACIÓN DEL EFECTO DE SOBREALCANCE ANALIZANDO LA SEÑAL DE OPERACIÓN.

Como bien ha sido mencionado la instalación de los capacitores serie para el aumento de transferencia de energía ha ido creciendo al paso de los años, por ello es de suma importancia conocer los problemas que estos generan, ya que se tiene como la problemática que al ser instalados los valores de falla son incrementados, además la presencia del capacitor serie afecta las señales de voltaje y corriente afectando la impedancia medida por el relevador de distancia, y por consiguiente el alcance del relevador.

Por ello se propone mitigar o reducir el efecto de sobrealcance cuando se es presentado en la protección de distancia y obtener un alcance dinámico adecuado a la operación.

#### 4.3.1 Formulación propuesta.

Se realizó una modificación de las señales de operación y polarización del relevador convencional, donde se toman en cuenta las ecuaciones (2.4) de las señales de entrada al comparador con la característica tipo Mho;

$$S_1 = -V_r \angle 0^\circ + Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r \quad S_2 = V_r \angle 0^\circ$$

Donde se tiene que el radio de las señales de entrada al comparador de fase puede ser expresado como,

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{-V_r \angle 0^\circ + Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r}{V_r \angle 0^\circ} \quad (4.3)$$

Para este caso se propone tomar en cuenta la impedancia del capacitor serie ( $Z_{CS} = -jX_c$ ) en la señal de operación  $S_1$ , para contra restar el efecto capacitivo que se tiene en la red y de esta manera mitigar el efecto de sobrealcance al tener instalado el capacitor serie.

$$\therefore \frac{S_1}{S_2} = \frac{-V_r \angle 0^\circ + Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r + Z_{CS}}{V_r \angle 0^\circ} \quad (4.4)$$

$$-V_r \angle 0^\circ + Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r + Z_{CS} = V_r \angle 0^\circ$$

$$-V_r \angle 0^\circ - V_r \angle 0^\circ = -Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r - Z_{CS}$$

$$\therefore Z_r = \frac{-Z_{R1} \angle \theta_1 \cdot I_r \angle -\phi_r - Z_{CS}}{-V_r \angle 0^\circ - V_r \angle 0^\circ} \quad (4.5)$$

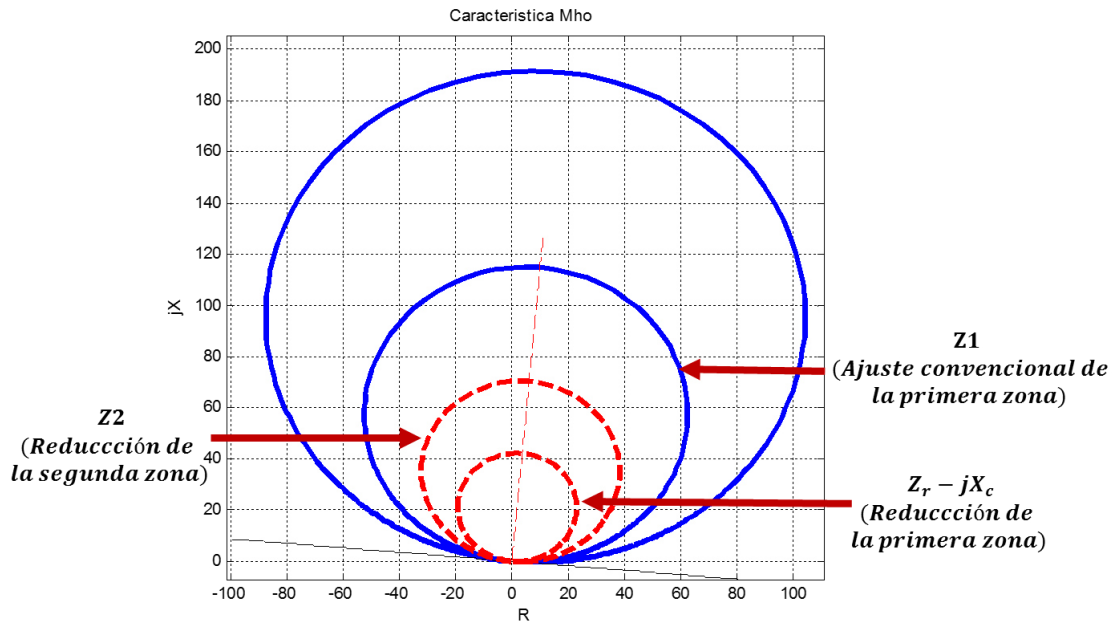


Figura 4.8. Ajuste convencional y reducción de la primera zona.

En la figura 4.8 se muestra una reducción (trazo punteado rojo) de las zonas de operación del ajuste convencional (trazo solido azul) para evitar el **sobrealcance**, donde esto fue logrado con el ajuste del efecto capacitivo.



#### 4.3.2. Adaptación en estado dinámico.

Como fue mencionado anteriormente el *MOV* es un dispositivo no lineal resistivo, que comienza a conducir cuando es superado el umbral de un voltaje específico y deja de conducir cuando el voltaje cae por debajo del mismo voltaje específico en cada medio ciclo.

En el caso cuando tengo un voltaje medido mayor que el de ajuste de sobrevoltaje, el *MOV* opera para disminuir el voltaje a través del capacitor, entonces se muestra un escenario adicional dinámico al momento que el *MOV* corto circuito al capacitor, al ocurrir este proceso las señales de medida del relevador son afectadas y la característica estará operando de manera convencional cuando está el *MOV* en servicio y además con una reducción dinámica de alcance a través del tiempo de la evolución de la falla cuando está el capacitor. Esto quiere decir, que existe un grado no lineal de variación en el tiempo de la compensación serie durante la falla, debido a las características de impedancia no lineal de la combinación del capacitor serie en paralelo con el *MOV* [2]. Esta condición suele ser muy corta pero puede ser repetida varias veces durante el período de falla.

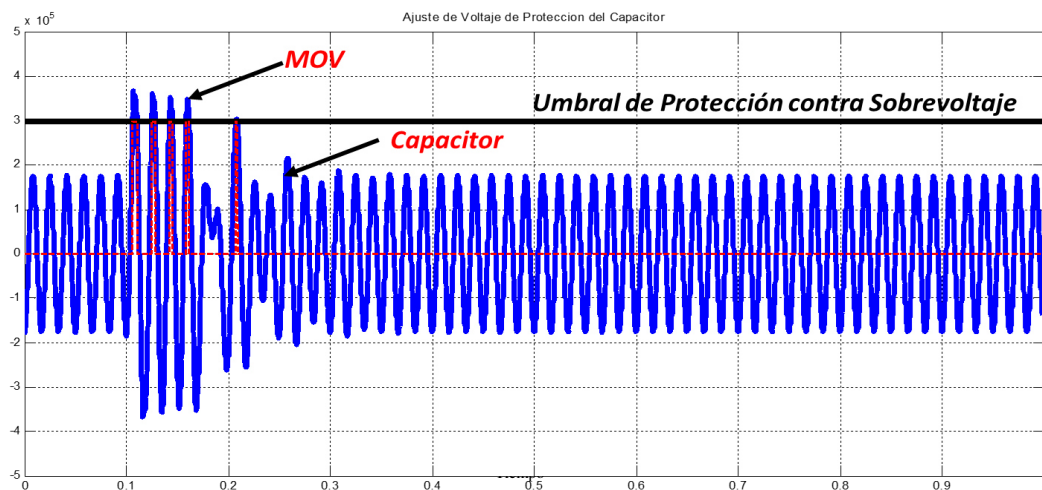


Figura 4.9. Voltaje en el *MOV* y capacitor serie.

Como se puede mostrar en la figura 4.9 en el ciclo  $t = 6$ , se aplica una falla trifásica, durante la falla se presenta un nivel de alta corriente donde se tiene un sobrevoltaje, entonces el *MOV* corto circuita al capacitor y se encuentra conduciendo dentro de cada medio ciclo ( $< 10\text{ ms}$ ), sin embargo al estar en operación este restablece la corriente e incrementa la impedancia [2]. Después del restablecimiento de la corriente, continuamente la falla se apaga por lo tanto se reduce el voltaje, entonces el capacitor regresa a servicio (ver figura 4.9).

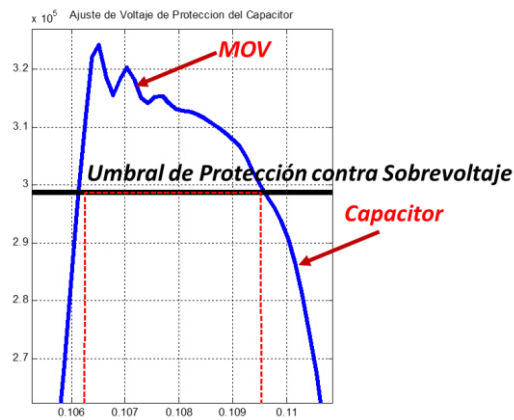


Figura 4.10. Tiempo de operación del *MOV*.

En este caso cuando se tiene alto nivel corriente de falla al que se hace referencia, la protección de distancia reacciona igual que en una línea normal no compensada [2]. En la figura 4.10 se muestra que el *MOV* está conduciendo 0.004 segundos, es decir 4 ms.

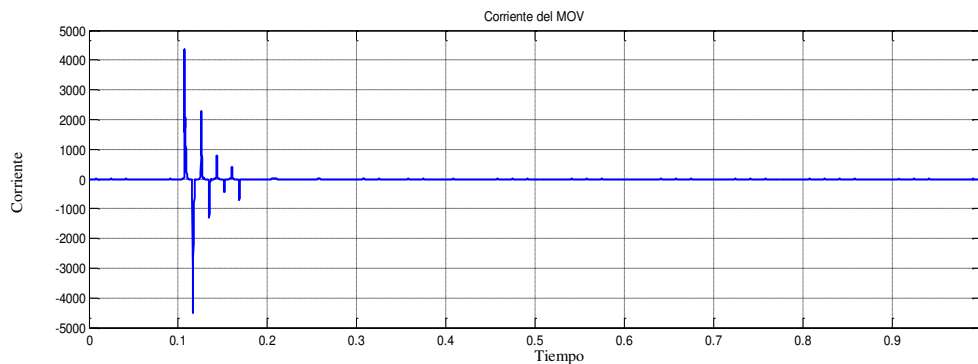


Figura 4.11. Corriente del *MOV*.

El *MOV* tiene un límite de corriente, que en realidad es la corriente donde comienza a conducir, usualmente es de 500 A o 1 kA. Se puede observar en la figura 4.11 que en un tiempo de  $t = 0.1$  segundos, la falla es aplicada.

La corriente incrementa en el capacitor serie y produce un sobrevoltaje, esto quiere decir, que el límite de corriente fue rebasado más allá de su valor de ajuste, por lo tanto esto hace que el *MOV* en este momento entre en operación. Después de un tiempo determinado de haber disminuido la corriente, el *MOV* puede desactivarse. Como también se puede observar en la figura 4.11 que en los 4 ciclos de falla, se tiene un indicativo de cuanta corriente está el *MOV* conduciendo, debido a que se detectó un sobrevoltaje, esto quiere decir que si tengo corriente en el *MOV* el capacitor está fuera de operación.

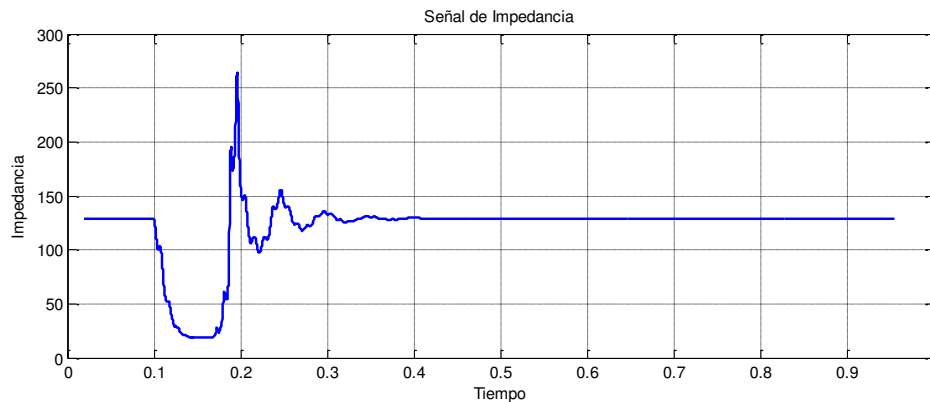


Figura 4.12. Señal de impedancia en el sistema.

Entonces al tener el *MOV* conduciendo hará que se vaya reduciendo la corriente, sin embargo cuando la corriente está disminuyendo, tengo un cambio en la impedancia del sistema, la cual se irá incrementando como es mostrado en la figura 4.12. Es decir, la impedancia disminuye cuando se presenta el incremento de corriente debido a la falla en un  $t = 0.1$  segundos, pero al estar el *MOV* conduciendo, instantáneamente se reduce la corriente e incrementa la impedancia en el sistema. En el instante cuando el capacitor está saliendo de operación, nos sirve para poder cambiar el ajuste de alcance, y tener una señalización para que el relevador de distancia sepa que el capacitor salió de operación.

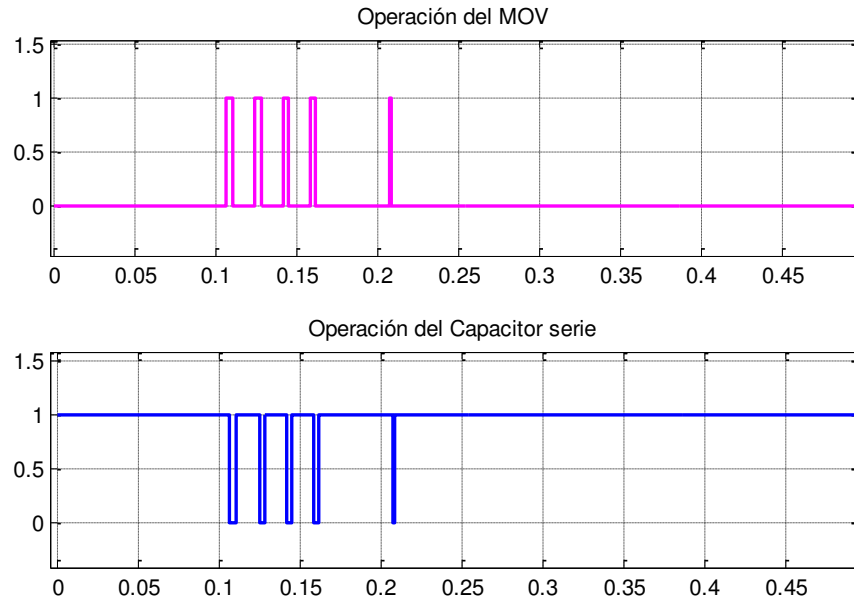


Figura 4.13. Operación del *MOV* y el capacitor.

En la operación del *MOV* tengo una señal senoidal y un umbral como fue mostrado anteriormente, cuando se rebasa este umbral conduce el *MOV*, en la figura 4.13 se puede observar que se tiene una representación de operación discreta, donde el *MOV* es lo suficientemente rápido para conducir y reiniciar dentro de medio ciclo. Por lo tanto, el *MOV* no cortocircuitaría al capacitor como lo haría el *airgap*.

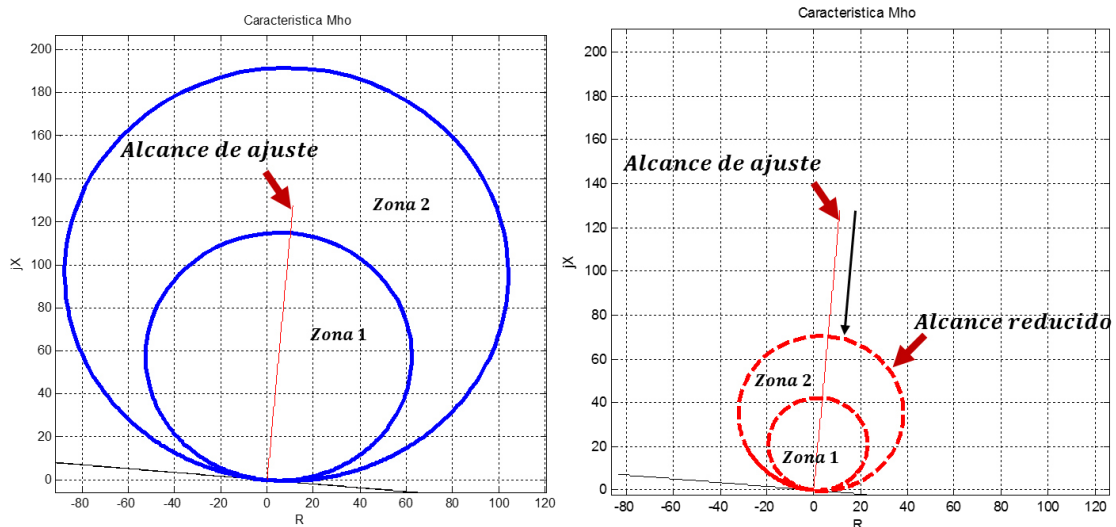


Figura 4.14. a. Alcance con *MOV*. b. Alcance con capacitor

Visualizando esta condición desde el punto de vista de la propuesta, donde se presenta la falla de alta corriente, el punto de alcance de la zona de operación del relevador no debe ser reducido (Ver figura 4.14.a), sin embargo cuando se presenta una falla de baja corriente y se encuentra el capacitor en funcionamiento, la zona de operación es considerablemente reducida como se observa en la figura 4.14.b. Por lo tanto para este efecto, cada medio ciclo se tendrá una característica diferente que se está moviendo dinámicamente debido al cambio de entrada y salida de operación del capacitor y el *MOV*.

#### **4.4 CONCLUSIONES.**

En este capítulo se analizaron funciones de adaptación y se realizó una propuesta, que es enfocada en el cambio de la característica tipo mho, donde también fue necesario mencionar las propuestas que se han llevado a cabo a lo largo de los años para la formulación de la característica adaptable.

Se tiene como aportación de esta tesis un relevador de distancia adaptable de característica tipo mho, donde se mitiga el efecto de sobrealcance provocado por la instalación del capacitor serie, a partir de la señal de operación de entrada al comparador. Se realizó una adaptación para reducir el efecto de sobrealcance ante condiciones de fallas.

La memoria de voltaje en su señal de polarización resulta una opción atractiva para el problema que se tiene con la inversión de voltaje, ya que con esta se puede formar una característica dinámica de la protección, donde el relevador operara también para el tercer y cuarto cuadrante.

## **CAPÍTULO 5.**

### **PRUEBAS FUNCIONALES.**

#### **5.1 INTRODUCCIÓN.**

Como fue presentado en el capítulo anterior el desarrollo de características dinámica adaptables ayudan a reducir los efectos que se tienen al tener instalado el capacitor serie, donde se han presentado buenos resultados en base al sobrealcance e inversión de voltaje generado por el capacitor serie. En este capítulo se evalúan esas características adaptables para verificar su funcionamiento ante este tipo de fallas, con la finalidad de que sean comparadas con respecto a la característica convencional y además de comprobar la correcta selectividad del relevador adaptable ante otros tipos de falla.

#### **5.2 PRUEBA AL PRIMER SISTEMA CON COMPENSACIÓN SERIE AL INICIO DE LA LÍNEA.**

Para evaluar las componentes del relevador adaptable propuesto se tomaron en cuenta los parámetros de la tabla 3.1, correspondientes al sistema mostrado en la figura 3.10.

De principio se realizó la prueba del sistema con una falla trifásica a tierra con compensación al 0%; de la figura 5.1.a se observa que la impedancia es realmente detectada en la segunda zona de operación del relevador sin compensación serie.

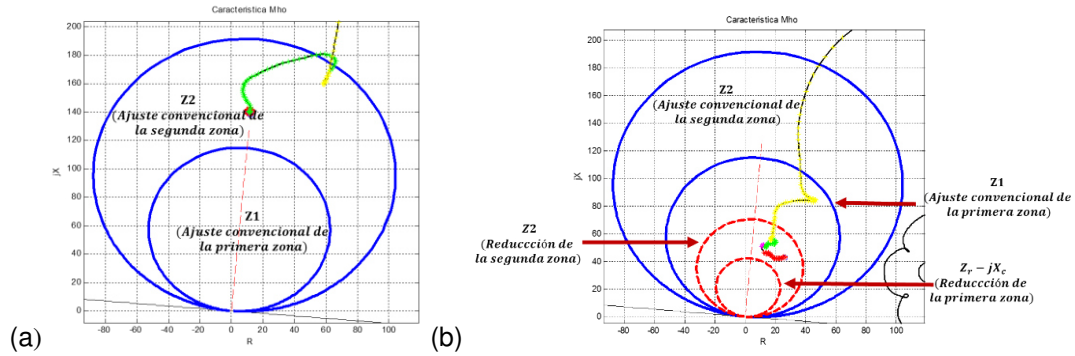


Figura 5.1. Operación de relevador del primer sistema a. Convencional. b. Propuesto.

Sin embargo, en la figura 5.1.b se tiene el mismo sistema con el capacitor serie al 60% de compensación, se observa que es presentado el efecto de **sobrealcance** hacia la primera zona del ajuste convencional (trazo solido azul) para este sistema. En la misma imagen se muestra una reducción (trazo punteado rojo) de las zonas de operación del ajuste convencional para evitar el **sobrealcance** que fue presentado hacia la primera zona, donde esto fue logrado con la propuesta de ajuste del efecto capacitivo de la ecuación (4.5).

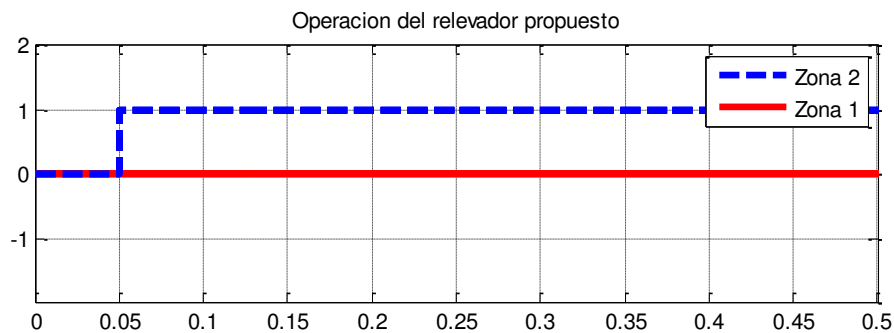


Figura 5.2. Operación de relevador propuesto en el primer caso.

De esta manera se puede observar que la impedancia es detectada en la segunda zona de operación del relevador como debería ser originalmente cuando no se tiene el capacitor en servicio (Ver figura 5.2); a diferencia de otras propuestas donde se mitiga el efecto desde la señal de polarización, en este caso fue llevado a cabo desde la señal de operación.

### 5.3 PRUEBA AL SEGUNDO SISTEMA CON COMPENSACIÓN SERIE AL INICIO DE LA LÍNEA.

En este caso se plantea el mismo escenario de sobrealcance propuesto en el sistema 2 de la figura 3.14 con parámetros correspondientes de la tabla 3.2. En donde se realizó la prueba con una falla trifásica mostrando la zona 1 y la zona 2 del relevador, utilizando una característica tipo mho; en la figura 5.3.a se observa que al no tener compensación en el sistema la falla es vista en la segunda zona de la característica del relevador.

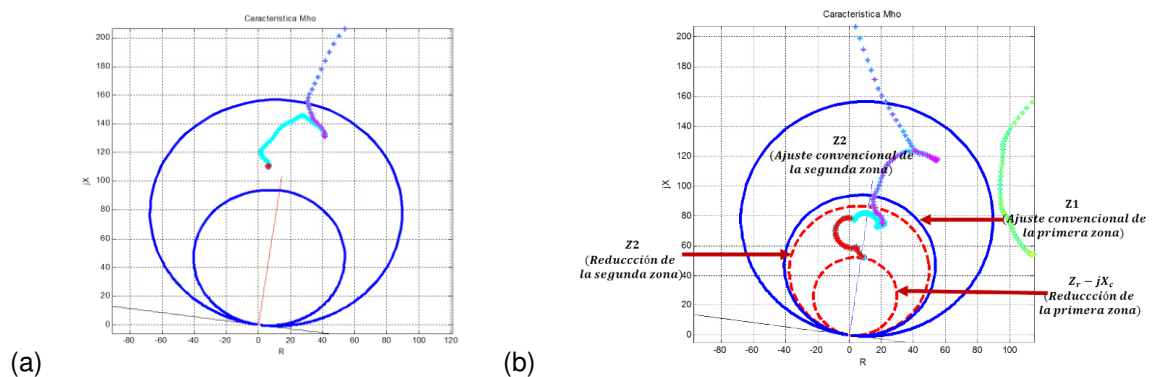


Figura 5.3. Operación de relevador del segundo sistema con compensación a inicio de la línea  
a. Convencional. b. Propuesto.

Sin embargo, al instalar el capacitor serie en la línea de transmisión con una compensación del 40% de la línea, se observa en la figura 5.3.b. que el relevador opera de forma incorrecta, debido a que se presenta un **sobrealcance** hacia la primera zona del ajuste convencional (trazo solido azul) operando el relevador en la zona 1 y no en la zona 2 donde realmente ocurre la falla.

Entonces, al ajustar la señal de operación del relevador convencional como es propuesto en la ecuación (4.5) se puede tener una reducción de las zonas de operación (trazo punteado rojo) para poder evitar el sobrealcance que fue presentado en la primera zona.



Se observa que la impedancia es detectada en la segunda zona de operación del relevador como debería ser originalmente cuando no se tiene el capacitor en servicio (Ver figura 5.4); y se evita una operación incorrecta del relevador de distancia.

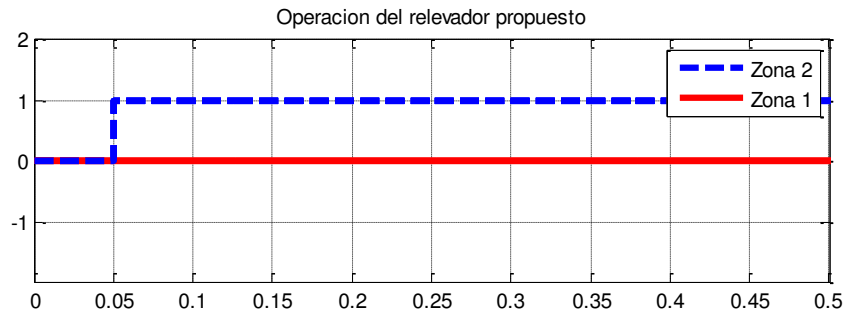


Figura 5.4. Operación de relevador propuesto en el segundo caso.

## 5.4 PRUEBA AL SEGUNDO SISTEMA PERO CON COMPENSACIÓN SERIE A MITAD DE LA LÍNEA.

Se planteó el mismo escenario que en el sistema anterior, sin embargo en esta prueba realizada anteriormente en la figura 3.16.a de la sección 3.4.1 se observó que el relevador de fase manda la señal de disparo para el evento sin compensación en la segunda zona. Sin embargo al tener el capacitor serie a mitad de la línea en la figura 3.13.b el relevador opera en la primera zona, de esta forma se observa que se tuvo un **sobrealcance** hacia la primera zona.

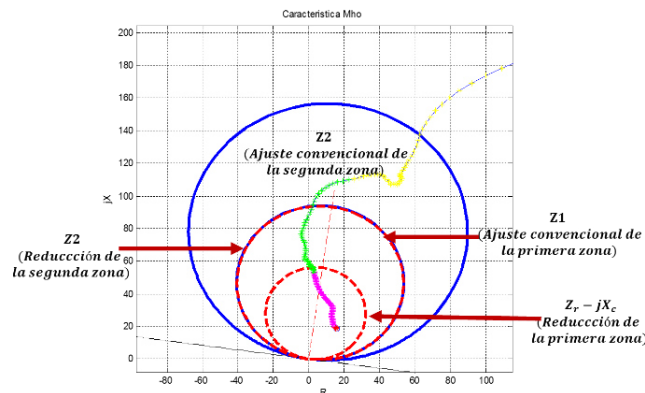


Figura 5.5. Operación de relevador del segundo sistema con compensación a mitad de la línea con característica convencional y propuesta.

En la figura 5.5 se presenta el ajuste convencional (trazo solido azul) y la reducción del ajuste (trazo punteado rojo) para mitigación del efecto, sin embargo, en este caso el sobrealcance no pudo ser mitigado, debido a que la reactancia capacitiva es demasiado pequeña para poder reducirse lo suficiente y ver la impedancia de falla en la segunda zona que es donde se presenta originalmente sin compensación. Cabe mencionar, que en algunos casos con diferentes parámetros este problema al tener la compensación a mitad de la línea es menor.

## 5.5 CASO DE ESTUDIO CON DIFERENTES NIVELES DE COMPENSACIÓN.

De la figura 3.18, que es retomada en la siguiente figura 5.6, se muestra que al no tener compensación, de igual manera que en casos anteriores, la impedancia vista por el relevador es detectada en la segunda zona de operación (ver figura 5.6.a), al contrario de cuando se tiene diferentes niveles de compensación en la misma línea, donde las trayectorias de impedancia tienen un **sobrealcance** hacia la primera zona como se muestra en la figura 5.6.b.

A continuación se muestran diferentes niveles de compensación con su respectiva reducción de la característica para mitigación del sobrealcance.

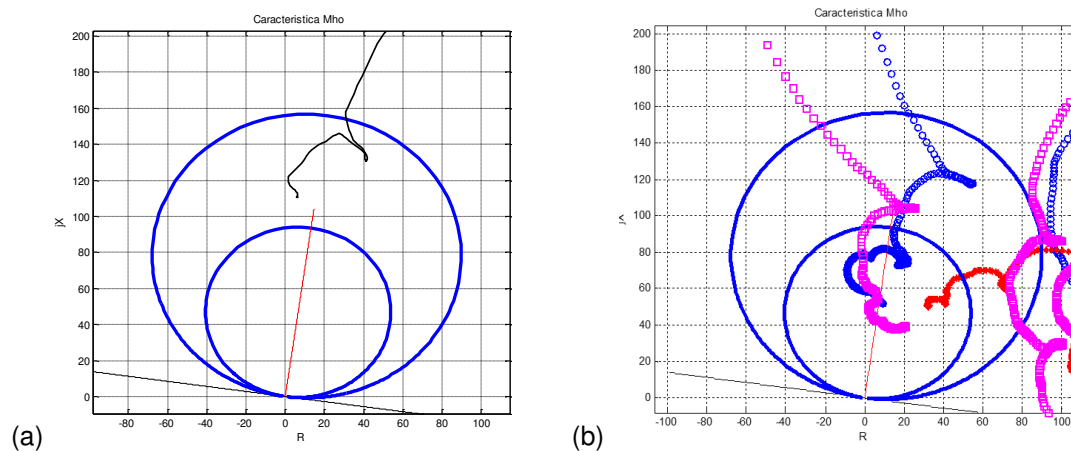


Figura 5.6. Impedancia vista por el relevador a. Sin compensación.

b. Con diferentes niveles de compensación.

## 1. Compensación al 20%.

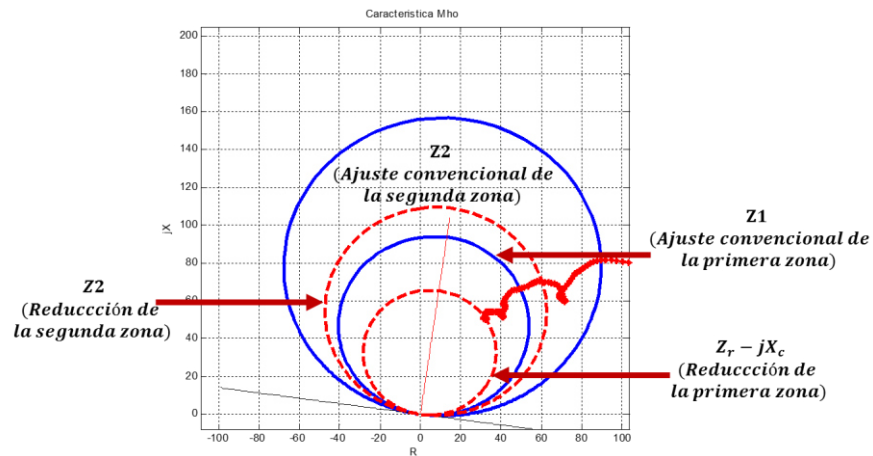


Figura 5.7. Reducción de la característica con 30% de compensación.

De la figura 5.7 se muestra la reducción (trazo punteado rojo) de las zonas de operación del relevador convencional, podemos observar que al tener una compensación al 30% de la línea se tiene un sobrealcance hacia la primera zona, sin embargo con el ajuste de la característica podemos evitar este problema y teniendo la operación del relevador como es normalmente, operando en la segunda zona que es donde se encuentra ubicada la falla.

## 2. Compensación al 40%.

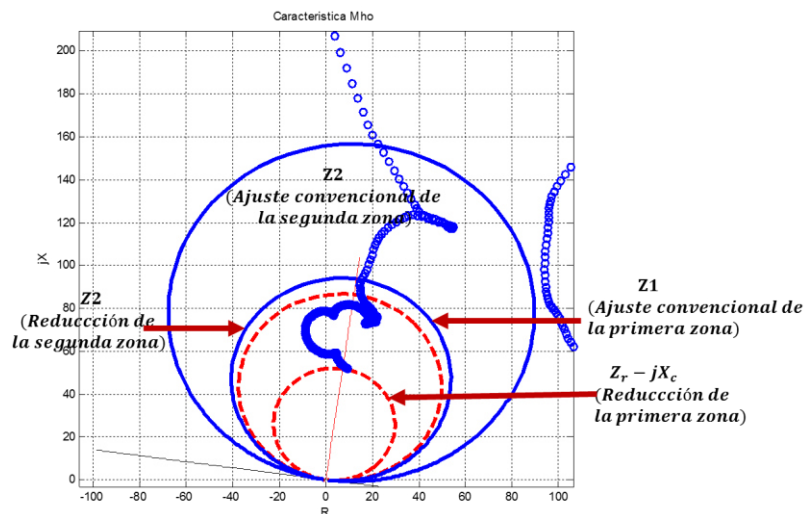


Figura 5.8. Reducción de la característica con 40% de compensación.

En la figura 5.8 se planteó el mismo escenario pero ahora con una compensación serie de 40% de la línea, se observa de igual manera como en casos anteriores que se presenta un sobrealcance hacia la zona 1, sin embargo, al ajustar la señal de operación con la reactancia capacitiva de la compensación serie, se tiene una reducción de la característica, entonces el problema de sobrealcance es mitigado.

### 3. Compensación al 60%.

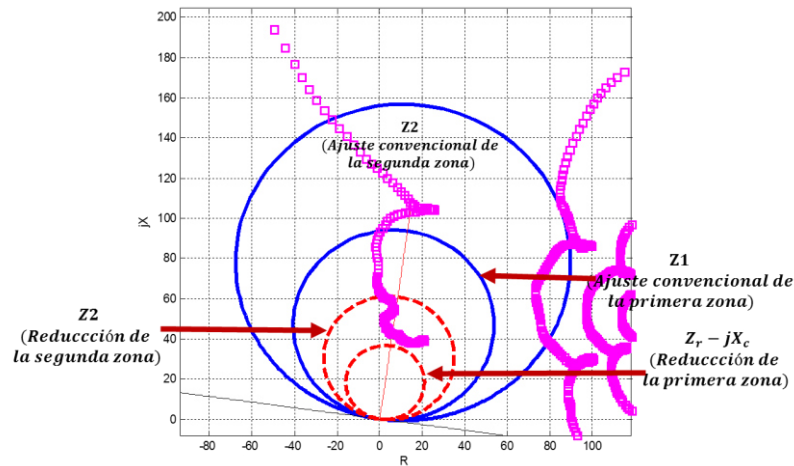


Figura 5.9. Reducción de la característica con 60% de compensación.

En la figura 5.9 se observa el mismo problema que en casos anteriores, sin embargo es presentado con una compensación del 60% de la línea.

## 5.6 MITIGACIÓN DEL EFECTO DE INVERSIÓN DE VOLTAJE.

Para contrarrestar la inversión de voltaje se evaluó uno de los métodos que son analizados en el capítulo anterior, de principio se tomó en cuenta el primer sistema mostrado anteriormente en la figura 3.10, donde se presenta este efecto solo cuando se tiene el capacitor junto con los elementos de protección (*MOV* y *airgap*) en la terminal izquierda de la línea simulada.

En la figura 5.10.a se muestra la trayectoria de la inversión de voltaje que cae en el cuarto cuadrante del plano complejo.

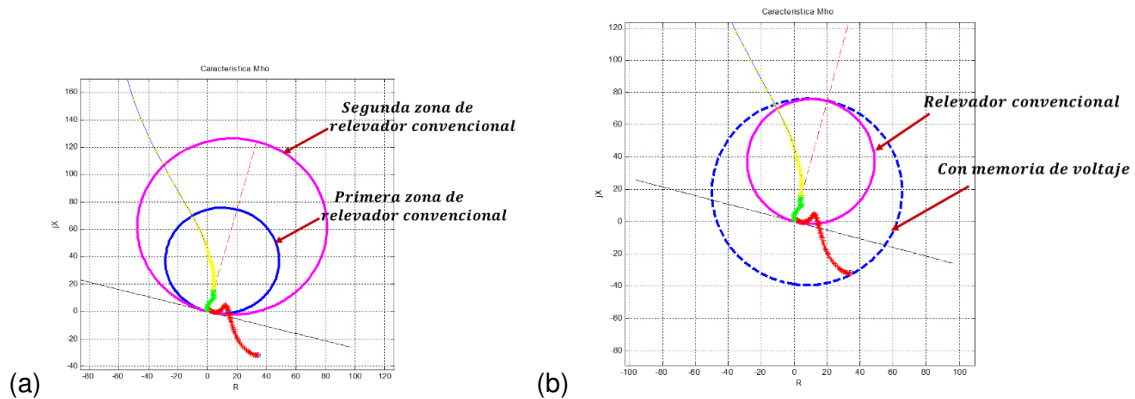


Figura 5.10.a. Simulación sin capacitor serie. b. Simulación de inversión de voltaje.

Anteriormente, se mencionó que una memoria de voltaje usa las fases no falladas durante una falla para poder obtener una característica adaptable, sin embargo, para este caso se presenta una falla trifásica en el sistema, por ello se utiliza un 10-20% del voltaje nominal para esta condición y se tiene como resultado una característica dinámica como es mostrado en la figura 5.10.b.

Durante la falla, la característica convencional no la ve en la zona de operación, pero al tener en cuenta la memoria la característica se hace más grande que la característica convencional, entonces se tiene una característica dinámica mho que se mueve del origen. La impedancia de polarización  $Z_p$  es calculada dividiendo  $V_{1mem}$  por el lazo de corriente como fue mencionado anteriormente en el capítulo cuatro.

## 5.7 CASO DE ESTUDIO CON ADAPTACIÓN DINÁMICA.

Para poder evaluar el impacto que se tiene al tener al *MOV* en servicio en la impedancia de la línea se realizó una simulación con falla trifásica en la línea. La primera simulación fue realizada con el *MOV* fuera de servicio. Se observa en la figura 5.11.a que la impedancia medida por el relevador se encuentra dentro de la primera zona de alcance, debido a que la reactancia del capacitor serie se encuentra en funcionamiento, como resultado, se tuvo un sobrealcance hacia la zona 1 y el relevador opero incorrectamente.

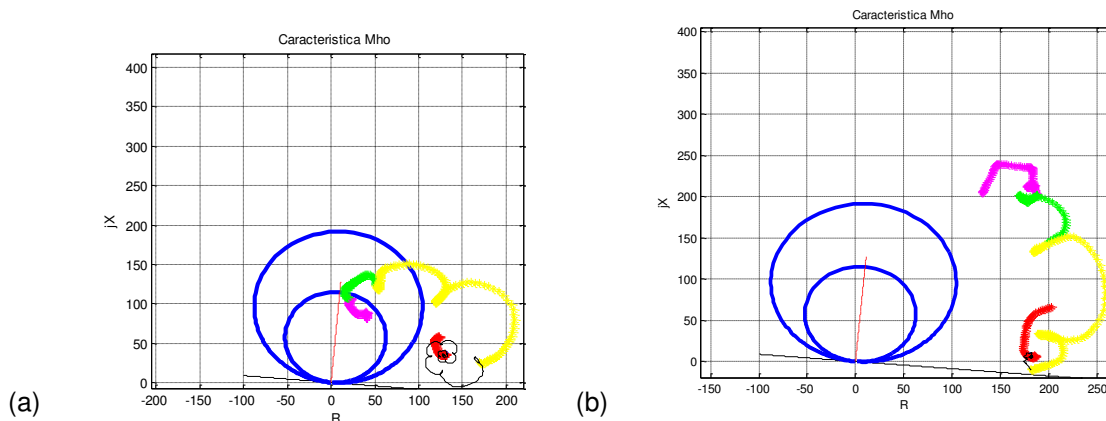


Figura 5.11. Operación del relevador con a. *MOV* fuera de servicio. b. *MOV* en servicio.

Sin embargo, cuando se realiza la misma simulación con el *MOV* conduciendo, la impedancia medida por el relevador se encuentra lejos de la característica de disparo, como se muestra en la figura 5.11.b. En este caso, la característica varía dependiendo de la impedancia del sistema, en la figura 5.12 se ilustra un cambio dinámico de la característica cuando se presenta la variación de la corriente en el tiempo. Por lo tanto, se tendrá una característica diferente que se está moviendo dinámicamente debido al cambio de entrada y salida de operación del capacitor y el *MOV*.

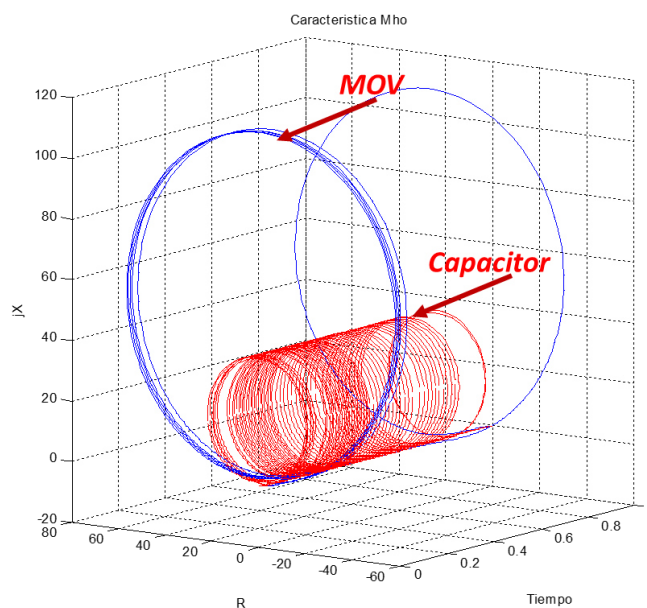


Figura 5.12. Operación del relevador dinámico.

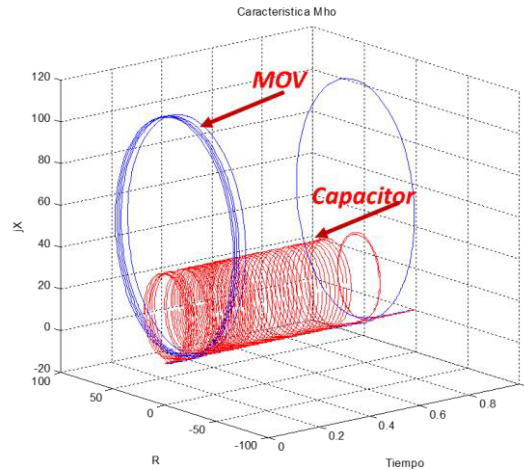


Figura 5.13. Característica dinámica.

De la figura 4.9 mostrada en el capítulo 4, se mostró que al ser presentada la falla trifásica en el *ciclo*  $t = 6$ , es presentado un nivel alto de corriente, es decir se tiene un sobrevoltaje, debido a esto el *MOV* corto circuita al capacitor. Al ocurrir este efecto, podemos observar de la figura 5.13 que al estar el capacitor conduciendo el alcance de la característica de operación se encuentra reducida para contra restar el efecto del capacitor serie, sin embargo al ser presentada la falla mencionada en el  $t = 0.1$  segundos el alcance de la primera zona de operación del relevador no es reducido, debido a que se mandó una señal al relevador demostrando que el *MOV* se encuentra en servicio y no es necesario contra restar el efecto capacitivo. En la figura 5.14 de igual manera se observa el comportamiento dinámico de operación de la característica.

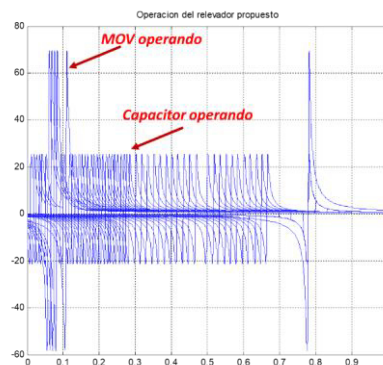


Figura 5.14. Operación del relevador con MOV y capacitor en servicio a través del tiempo.



## 5.8 EVENTOS REALES.

El relevador de distancia también es evaluado con señales de prueba de eventos reales, donde el relevador incluye la modificación de la característica. Si bien, el relevador de distancia fue programado en el lenguaje de programación *Matlab®*, las señales de eventos reales se encuentran en formato *COMTRADE®*, sin embargo *Matlab®* permite llamar estos archivos para realizar las pruebas correspondientes.

Se tienen las señales de los eventos reales en formato *COMTRADE®*, sin embargo los datos de corriente y voltaje fueron introducidos a *Matlab®* para realizar el procesamiento digital y evaluar la operación del relevador de distancia.

- Evento 1.

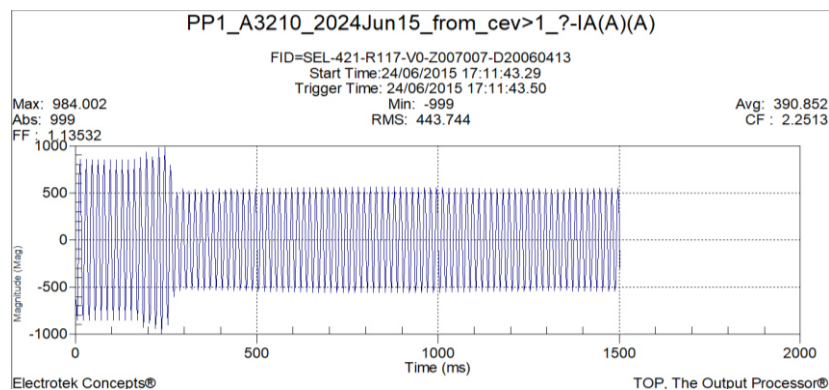


Figura 5.15. Señal de corriente en el primer evento real.

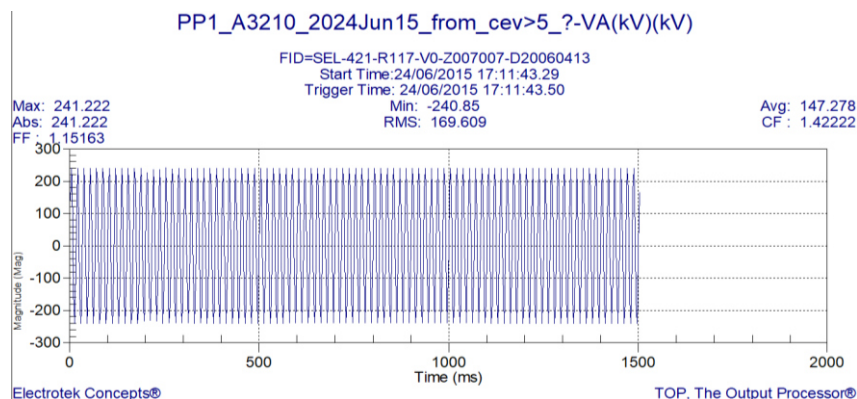


Figura 5.16. Señal de voltaje en el primer evento real.



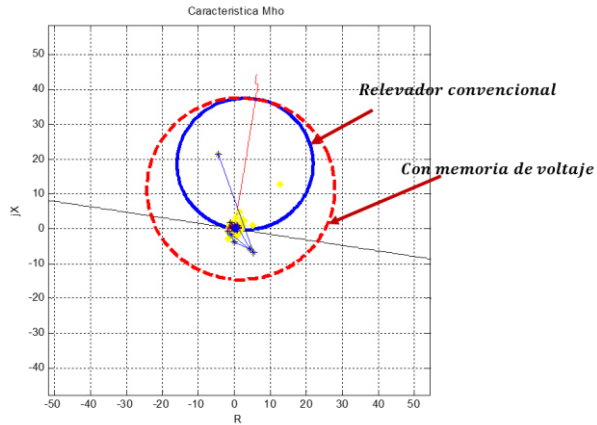


Figura 5.17. Característica de operación en el primer evento real.

En las figuras 5.15 y 5.16 se muestran las señales de entrada de corriente y voltaje al relevador de distancia, en la figura 5.17 se observa trayectoria de impedancia junto con la característica de operación convencional y con memoria de voltaje, se observa que la trayectoria termina en el tercer cuadrante, sin embargo como fue mencionado el relevador puede variar la característica de operación, así teniendo una mejor respuesta ante este tipo de evento de prueba.

- Evento 2.

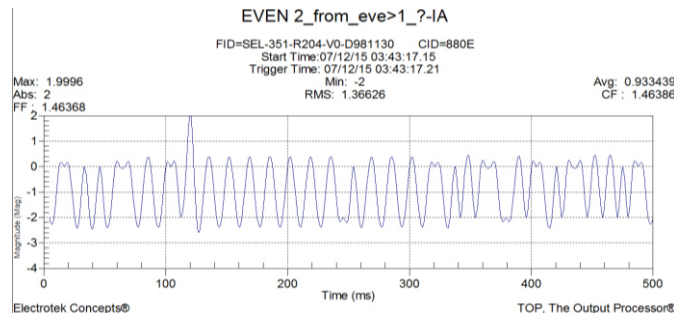


Figura 5.18. Señal de corriente en el segundo evento real.

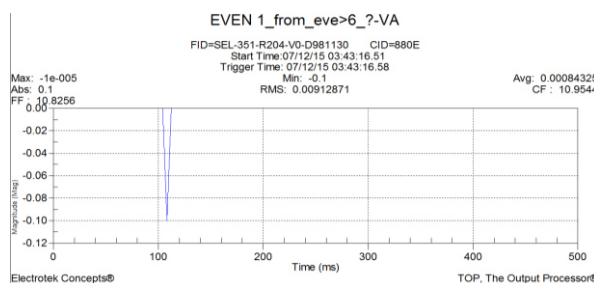


Figura 5.19. Señal de voltaje en el segundo evento real.

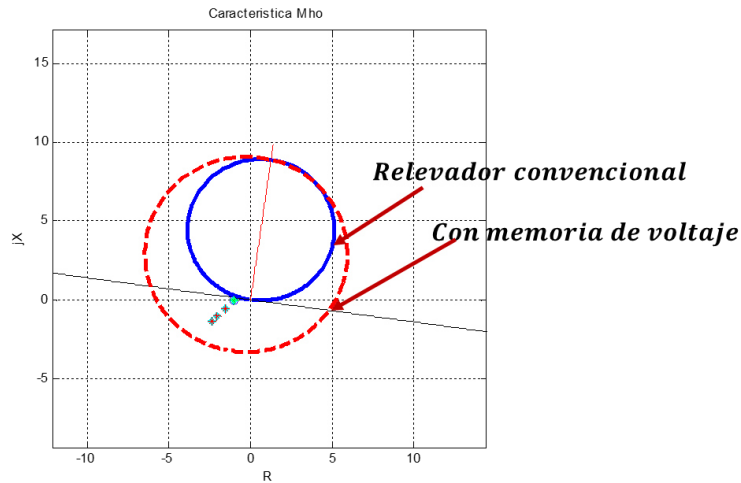


Figura 5.20. Característica de operación en el segundo evento real.

Para este evento de prueba se observa algo similar al primer evento donde la trayectoria termina en el tercer cuadrante (ver figura 5.20), entonces el relevador varía la característica de operación para tener respuesta ante este tipo de evento de prueba.

- Evento 3.

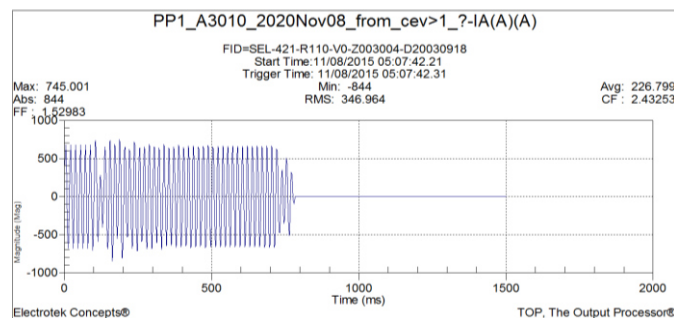


Figura 5.21. Señal de corriente en el tercer evento real.

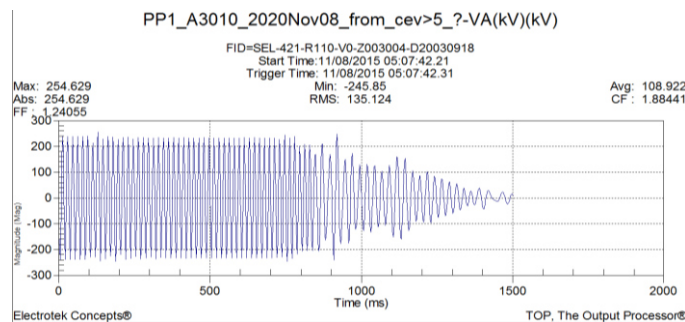


Figura 5.22. Señal de voltaje en el tercer evento real.

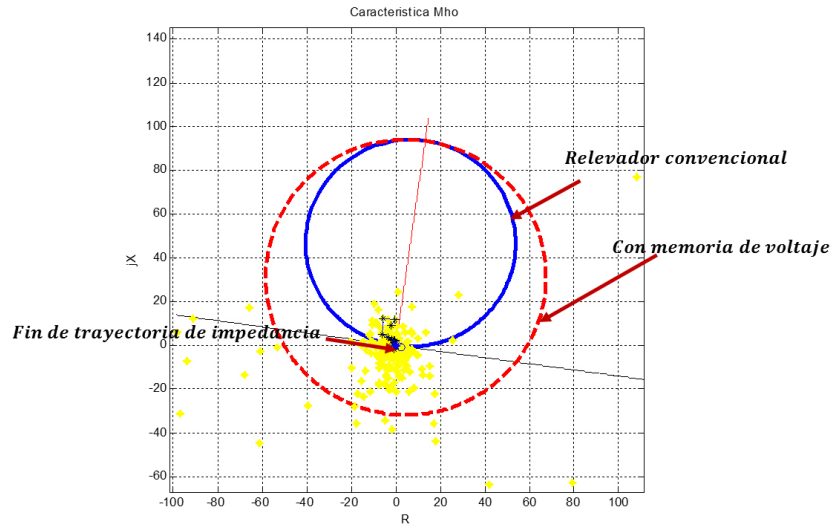


Figura 5.23. Característica de operación en el tercer evento real.

La trayectoria de impedancia que se muestra en este evento es debido al procesamiento digital de las señales de entrada, donde se observa que la trayectoria tiene un proceso aleatorio, sin embargo termina cerca del cuarto cuadrante debido a una inversión de la señal, entonces al entrar en operación la memoria de voltaje es capaz de detectar la falla, teniendo de esta manera una característica dinámica.

## 5.9 CONCLUSIONES.

Se realizaron las pruebas con la señal de adaptación propuesta en el capítulo 4 para poder tener una validación de la misma;

Se observa que la característica de operación del relevador se tiende a reducir con la funcionalidad de que no se tenga un problema de sobrealcance hacia la primera zona. Entonces se demostró que la característica adaptable permite detectar la falla en su zona de operación donde realmente debería estar.

El relevador de distancia diseñado nos permite realizar cambios en la característica de operación mediante las señales de entrada a los comparadores.

## **CAPÍTULO 6.**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

#### **6.1 INTRODUCCIÓN.**

En este capítulo se presentan los puntos más importantes en este trabajo de investigación, las aportaciones que se lograron obtener, así como las recomendaciones para trabajos futuros relacionados con los efectos que se tiene en el relevador de distancia al tener compensación serie.

Al instalar capacitores serie en las líneas de transmisión para aumentar la potencia transmitida, se tienen ciertos efectos que llegan a ocasionar problemas para la detección de fallas en la protección de distancia, como sobrealcance, subalcance e inversión de voltaje/corriente, donde al ser presentados estos efectos el relevador actuara de manera incorrecta a la operación.

Cabe mencionar, que se han presentado sistemas donde además de tener líneas paralelas con acoplamiento mutuo para el incremento de potencia, se han instalado también capacitores serie en las líneas paralelas, de esta manera teniendo un problema mayor en las señales de voltaje y corriente que son vistas por la protección de distancia.

Para el análisis del problema se realizaron algunas consideraciones, y el modelado de la protección de distancia con sus diferentes características de operación, así como también un filtrado fasorial de las señales de entrada a los comparadores del relevador, se probó su funcionalidad para poder trabajar a lo largo del desarrollo de la tesis con este modelado.

El método propuesto es utilizado para mitigar el efecto de sobrealcance de la protección de distancia en una característica tipo mho, de igual manera se analizaron algunas funciones para tener una característica dinámica que sea adaptable cuando se es presentado una inversión de voltaje. Se realizaron pruebas en algunos sistemas mostrados al relevador para evaluar la funcionalidad.

## **6.2 CONCLUSIONES GENERALES.**

- La operación errónea del relevador de distancia es debido a que sus señales de entrada fueron afectadas por la presencia del capacitor serie y sus dispositivos de protección de sobrevoltaje, por consiguiente, cambiando la impedancia vista por la protección.
- El diseño del modelado de la protección de distancia que fue presentado, nos permitió evaluar la operación de la misma con diferentes condiciones, donde mismo se presentaron diversas características de operación.
- El análisis del modelo del capacitor serie con su dispositivo de protección de sobrevoltaje *MOV* nos sirvió para evaluar y registrar los problemas que llega a ocasionar al relevador de distancia.
- La modificación que se realiza en la señal de operación para la obtención de una característica adaptable nos permite mitigar el efecto de sobrealcance en el relevador de distancia provocado por el capacitor serie.
- La reducción que se tiene de alcance de las zonas de operación, al ser agregada la impedancia del capacitor, nos sirve para contra restar el efecto capacitivo, por lo tanto reducimos el error que se tiene por sobrealcance.

- De los problemas que se tienen al tener compensación serie instalada, se presenta la inversión de voltaje, sin embargo este problema es conveniente que sea atacado desde la señal de polarización de la protección, obteniendo la protección dinámica adaptable a este problema.
- Para el problema de acoplamiento mutuo junto con compensación serie se han propuesto diferentes tipos de protección y algoritmos con el fin de mitigar este problema, pero ninguno ha propuesto una solución completa debido a las varianzas que se tiene en el sistema.

### **6.3 APORTACIONES.**

- Se desarrolló la metodología para el diseño del relevador de distancia, se realizó una estimación fasorial de señales por medio de filtros convencionales, así como también se realizaron diferentes características de operación.
- Las pruebas y simulaciones de los diferentes sistemas fueron desarrollados en el lenguaje de programación *Matlab*®.
- Se propuso un relevador de distancia con reducción en el alcance de las zonas de operación para contra restar el efecto capacitivo.
- Implementación de un relevador de distancia con dinámica adaptable desde su señal de polarización para atacar el efecto de inversión de voltaje.
- Se demostró con los resultados de las pruebas realizadas, que el algoritmo propuesto e implementado compensa el error de compensación serie en las señales de medición.

## **6.4 TRABAJOS FUTUROS.**

- Implementar un relevador de distancia dinámico con una memoria de voltaje desde su señal de operación.
- Elaborar nuevos relevadores con características adaptables analizando otros escenarios posibles.
- Desarrollar un esquema con características de operación que pueden llegar a ser adaptables para una mejor discriminación cuando se presenta acoplamiento mutuo en líneas paralelas y además de esto, compensación serie en las líneas.

## REFERENCIAS.

1. L. A. Trujillo Guajardo, A. Conde Enriquez, *Enhanced performance for distance relays due to series capacitors in transmission lines*. *Electric Power Systems Research*. 109, 20–31 (2014).
2. Gerhard-Ziegler. *Numerical Distance Protection Principles and Applications*, Siemens AG, Berlín y Munich, 1999.
3. Cook V. *Analysis of Distance Protection*, 1ª ed., Inglaterra, RSP Gales, John Wiley and Sons Inc, 1985.
4. Blackburn, J. L., *Protective Relaying: Principles and Applications*, Mercel Dekker, Inc., New York, 1987.
5. Stan Wilkinson, *Series Compensated Line Protection Issues*. GE Power Management. GE Power Management. 215 Anderson Ave. Markham, Ontario, Canada. L6E 1B3.
6. A. Pradhan, P. Jena, *A positive sequence directional relaying algorithm for series compensated line*. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 1–1 (2011).
7. *IEEE Guide for Protective Relay Application to Transmission-Line Series Capacitor Banks*, IEEE Standard C37.116, 2007
8. B. Kasztenny, *Distance protection of series compensated lines—problems and solutions*, in 28th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, 22–25 Oct 2001, pp. 1–34.
9. B. Vyas, R. P. Maheshwari, B. Das, *Protection of series compensated transmission line: Issues and state of art*. *Electric Power Systems Research*. 107 (2014), pp. 93–108.
10. D. Novosel, A. Phadke, M. M. Saha, S. Lindahl, *Problems and solutions for microprocessor protection of series compensated lines in IEE Conference Publication* (1997; in *Proc. Develop. Power Syst. Protect*), pp. 18–23.
11. Mandour, M. and El-Alaily, A. *Swivelling characteristic for the protection of series compensated lines*. *Electric Power Systems Research*, 18(1990), pp.31–35.
12. Shah, A.B., Sood, V.K., Saad, O., and Ramachandran, V. *Mho relay for protection of series compensated line*. In *TIC-STH'09: 2009 IEEE Toronto International Conference - Science and Technology for Humanity*, (2009) pp. 648–651.
13. W.J.Cheetham, A.Newbould, G.Stranne, *“Series Compensated Line Protection: System Modeling and Test Results”*, 15th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, 1988
14. V. Chakrapani, S. Swarup, *Limitations of Angle based Faulty Line Identification Logic In Series Compensated Parallel Transmission Lines*. *IEEE Transactions on Power Delivery*. PP, 1–1 (2015).
15. Altuve, H. J., Mooney, J. B., & Alexander, G. E. *Advances in series-compensated line protection*. In *2009 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers* (2009) pp. 263–275.
16. S. Srivani, K. Vittal, *Adaptive distance relaying scheme in series compensated transmission lines*, in: *Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) and 2010 Power India*, IEEE, 2010, pp. 1–7.
17. E.O. Schweitzer III, J. Roberts, *Distance relay element design*, in: *46th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, Texas A&M University, College Station, Texas, 1993.



18. D. L. Goldsworthy, *A Linearized Model for Mov-Protected Series Capacitors*. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2, 953–957 (1987).
19. U. B. Parikh, B. Das, R. Maheshwari, *Fault classification technique for series compensated transmission line using support vector machine*. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 32 (2010).
20. M. M. Saha, B. Kasztenny, E. Rosolowski, J. Izykowski, *First zone algorithm for protection of series compensated lines*. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 16, 200–207 (2001).
21. T. Dalstein, B. Kulicke, *Neural network approach to fault classification for high speed protective relaying*. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 10, 1002–1011 (1995).
22. J. M. Kennedy G. E. Alexander, J. S. Thorp Cornell, *Variable Digital Filter Response Time in a Digital Distance Relay -GER-3798 Protection and Control General Electric Company Malvern, PA J. S. Thorp Cornell University Ithaca, NY*
23. O. Sivov, H. Abdelsalam, E. Makram, *Adaptive setting of distance relay for MOV-protected series compensated line considering wind power*. *Electric Power Systems Research*. 137, 142–154 (2016)
24. N. Perera, A. Dasgupta, K. Narendra, K. Ponram, R. Midence, A. Oliveira, *Enhanced distance protection for series compensated transmission lines*. *Conference of Electric Power Supply Industry 2014 (CEPSI 2014)*
25. P. K. Dash, S. R. Samantaray, G. Panda, *Fault Classification and Section Identification of an Advanced Series-Compensated Transmission Line Using Support Vector Machine*. *Power Delivery, IEEE Transactions on*. 22, 67–73 (2007).
26. Rogelio A. Castro, and Pineda, H.A., *"Protection System Considerations for 400 kV Series Compensated Transmission Lines of the Central Western Network in Venezuela," Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES, pp.1-5, 15-18 Aug. 2006.*
27. D. W. P. Thomas, C. Christopoulos, *Ultra-High Speed Protection of Series Compensated Lines*. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 7, 139–145 (1992).
28. Hashemi, S., Hagh, M. and Seyedi, H. *A Novel Backup Distance Protection Scheme for Series-Compensated Transmission Lines*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(2), (2014) pp.699-707.
29. Yi Hu, Novosel, D., Saha, M. and Leitloff, V. (2002). *An adaptive scheme for parallel-line distance protection*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(1), pp.105-110.
30. Makwana, V. and Bhalja, B. (n.d.). *Transmission line protection using digital technology*. 1st ed.
31. B. R. Bhalja, R. P. Maheshwari, *High-resistance faults on two terminal parallel transmission line: Analysis, simulation studies, and an adaptive distance relaying scheme*. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 22, 801–812 (2007).
32. V. Chakrapani, S. Swarup, *Limitations of Angle based Faulty Line Identification Logic In Series Compensated Parallel Transmission Lines*. *IEEE Transactions on Power Delivery*. PP, 1–1 (2015).
33. Seyedi, H. and Behroozi, L. *New distance relay compensation algorithm for double-circuit transmission line protection*. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 5(10), (2011). p.1011.
34. Wedepohl, L. *Polarised mho distance relay. New approach to the analysis of practical characteristics*. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 112(3), (1965) p.525.

35. T. S. Sidhu, M. Khederzadeh, *Series compensated line protection enhancement by modified pilot relaying schemes*. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 21, 1191–1198 (2006).
36. Donald D. Fentie, *Understanding the Dynamic Mho Distance Characteristic*.
37. Daqing Hou, Armando Guzmán, and Jeff Roberts, *Innovative Solutions Improve Transmission Line Protection*. Presented at the 1998 Southern African Conference on Power System Protection Midrand, South Africa November 3–4, 1998.
38. Edmund O. Schweitzer, III. *New Developments in Distance Relay Polarization and Fault Type Selection*. Presented at the 16th Annual Western Protective Relay Conference, October 1989.
39. T. Einarsson, P. Wennerlund, L. Cederblad, S. Lindahl and S. Holst, “Experiences of current differential protections for multi-terminal power lines using multiplexed data transmission systems”, *Cigre’*, 34- 203, Paris, August ,1994.
40. CICRE, Working Group of Study Committee 34, “Application Guide on Protection of Complex Transmission Networks”, May 1991.
41. F. Anderson and W. Elmore, “Overview of SeriesCompensated Line Protection Philosophies”, Western Relay Protective Conference, Washington State University, Spokane, Washington, October 1990.
42. W. J. Cheetham, A Newbould, and G. Stranne, “SeriesCompensated Line Protection: System Modeling and Test Results”, 151h Annual Western Relay Protective Conference.
43. R. J. Marttila, *Performance of distance relay MHO elements on mov-protected series-compensated transmission lines*. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 7, 1167–1178 (1992).
44. R. Grünbaum, K. Wikström, G. Strömberg, *On series compensation impact on line protection and TRV*, in: North American Power Symposium (NAPS), Västerås, Sweden, 2009 October, pp. 1–5.
45. E. Rosolowski, . Izykowski, P. Pierz, M. Fulczyk, P. Balcerek, M.M. Saha, *High voltage series-compensated transmission line-evaluation of new distance protection*, in 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2010 (2010), pp. 513–516.
46. C. S. Yu, J. Z. Yang, C. W. Liu, *New Fourier filter design for fault current filtering of series compensated lines*. *International Journal of Power and Energy Systems*. 28, 203–210 (2008).
47. Megahed, A., MonemMoussa, A. and Bayoumy, A. (2006). *Usage of Wavelet Transform in the Protection of Series-Compensated Transmission Lines*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(3), pp.1213-1221.
48. P. K. Dash, S. R. Samantray, *Phase selection and fault section identification in thyristor controlled series compensated line using discrete wavelet transform*. *International Journal of Electrical Power and Energy System*. 26, 725–732 (2004).
49. D. Novosel, B. Bachmann, D. Hart, Y. Hu, M. M. Saha, *Algorithms for locating faults on series compensated lines using neural network and deterministic methods*. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 11, 1728–1734 (1996).
50. Bachmann, B., Novosel, D., & Hart, D. *Application of artificial neural networks for series compensated line protection*. In *Applications to PowerIntelligent Systems Applications to Power Systems*, (1996) pp. 68–73.

51. Q. Xuan, Y. Song, A. Johns, R. Morgan, D. Williams, *Performance of an adaptive protection scheme for series compensated EHV transmission systems using neural networks*, *Electric Power Systems Research* 36 (1996). 57–66
52. A. A. Girgis, A. A. Sallam, A. Karim El-Din, *An adaptive protection scheme for advanced series compensated (ASC) transmission lines*. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 13, 414–420 (1998).
53. M. M. Saha, J. Izykowski, E. Rosolowski, B. Kasztenny, *A new accurate fault locating algorithm for series compensated lines*. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 14, 789–795 (1999).
54. C.M. Leoaneka, *Dynamic Performance of numerical Distance Protection Relays in Heavily Series Compesated Networks*, School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, University of KwaZulu-Natal, Durban, South Africa, 2010.
55. C. A. Apostolopoulos, G. N. Korres, *Accurate fault location algorithm for double-circuit series compensated lines using a limited number of two-end synchronized measurements*. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 42, 495–507 (2012).
56. A. G. Jongepier, L. van der Sluis, *Adaptive Distance Protection of a Double-Circuit Line*. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 9, 1289–1297 (1994).
57. M. H. J. Bollen, *Travelling-wave-based protection of double-circuit lines*, *Proc. Inst. Elect. Eng.*, pt. C, vol. 140, no. 1, pp. 37–47, Enero. 1993.
58. P. G. McLaren et al., *Enhanced double circuit line protection*. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 12, 1100–1105 (1997).
59. Phadke, A. and Jihuang, L. *A New Computer Based Integrated Distance Relay For Parallel Transmission Lines*. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(2), (1985) pp.445-452.
60. M. I. Gilany, O. P. Malik, G. S. Hope, *A Digital Protection Technique for Parallel Transmission Lines Using a Single Relay at Each End*. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 7, 118–125 (1992).